



TUGAS AKHIR TF 091381

***TUNING* KONTROLLER PID PADA BOILER -
TURBIN BERDASARKAN STRATEGI KONTROL
TERKOORDINASI**

Lenzy Andre Famela
NRP 2410100076

Dosen Pembimbing
Totok Ruki Biyanto, Ph.D

JURUSAN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2014



FINAL PROJECT TF091381

***TUNING PID CONTROLLER IN BOILER-
TURBINE BASED ON COORDINATED
CONTROL STRATEGY***

Lenzy Andre Famela
NRP 2410100076

Supervisor
Totok Ruki Biyanto, Ph.D

DEPARTEMENT OF ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2014

**LEMBAR PENGESAHAN
TUNING KONTROLLER PID PADA BOILER-TURBIN
BERDASARKAN STRATEGI KONTROL
TERKOORDINASI**

TUGAS AKHIR

Oleh:

**LENZY ANDRE FAMELA
NRP. 2410100076**

**Surabaya, 6 Agustus 2014
Mengetahui/Menyetujui**

Pembimbing



**Totok Ruki Biyanto, Ph.D
NIPN. 197107021998021001**

**Ketua Jurusan
Teknik Fisika, FTI – ITS**



**Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA
NIPN. 196503091990021001**

LEMBAR PENGESAHAN
TUNING KONTROLLER PID PADA BOILER-TURBIN
BERDASARKAN STRATEGI KONTROL
TERKOORDINASI

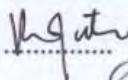
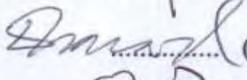
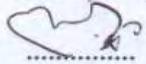
TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Rekayasa Instrumentasi
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

LENZY ANDRE FAMELA
NRP 2410100076

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Totok Ruki Biyanto, Ph.D  (Pembimbing)
2. Ir. Ronny Dwi Noriyati, M.Kes  (Penguji I)
3. Ir. Tutug Dhanrdono, M.T  (Penguji II)
4. Andi Rahmadiansah, S.T, M.T  (Penguji III)

SURABAYA, AGUSTUS 2014

TUNING KONTROLLER PID PADA BOILER-TURBIN BERDASARKAN STRATEGI KONTROL TERKOORDINASI

Nama Mahasiswa : Lenzy Andre F
NRP : 2410 100 076
Jurusan : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Totok Ruki Biyanto, Ph.D

Abstrak

Boiler-turbin merupakan objek paling penting dalam proses pembangkit listrik atau biasa disebut front end control. Oleh sebab itu diperlukan pemilihan strategi kontrol yang tepat, dan tuning pengendali yang baik agar diperoleh proses produksi listrik yang terkendali dan memiliki performansi yang baik. Berdasarkan kebutuhan tersebut, dilakukan simulasi tuning pengendali menggunakan metode IMC-PID pada boiler-turbin berbasis Coordinated Control Mode (CCM). Dari hasil simulasi didapatkan nilai parameter λ untuk pengendali LIC-100 sebesar 2 menit, kemudian untuk pengendali TIC-100 sebesar 3,5 menit, lalu untuk pengendali PIC-100 sebesar 10 menit, dan untuk pengendali IC-100 sebesar 3 menit. Dari hasil tuning didapatkan nilai performansi pengendali terbaik pada loop IC-100 CCM dengan nilai IAE sebesar 1173,77 untuk uji penurunan set point daya listrik, dan nilai IAE sebesar 1178,62 untuk uji kenaikan set point daya listrik, sedangkan untuk nilai max. overshoot didapatkan sebesar 0,263 % pada uji penurunan set point daya listrik dan nilai max. overshoot sebesar 0,67 % pada uji kenaikan set point daya listrik, kemudian didapatkan nilai settling time sebesar 21 menit untuk uji penurunan set point daya listrik, dan didapatkan nilai settling time sebesar 19 menit untuk uji kenaikan set point daya listrik.

Kata kunci: Boiler-turbin, IMC-PID, Coordinated Control Mode

TUNING PID CONTROLLER IN BOILER-TURBIN BASED ON COORDINATED CONTROL STRATEGY

Name : Lenzy Andre F
NRP : 2410 100 076
Department : Teknik Fisika FTI - ITS
Supervisor : Totok Ruki Biyanto, Ph.D

Abstract

Boiler-turbine is the most important object in power generation process or it usually called front end control. Because of that, selection of appropriate control strategies, and good tuning controllers to obtain controlled of electricity production process which has good performance is required. Based on those needs, did simulations using IMC-PID controller tuning method in boiler-turbine based on Coordinated Control Mode (CCM). From the result of simulations obtained values for the λ parameter for LIC-100 controller has amount of the value 2 minutes, then for TIC-100 controller has amount of the value 3,5 minutes, then for PIC-100 controller has amount of the value 10 minutes, and for the IC-100 controller has amount of the value 3 minutes. From the results of tuning controller, obtained the best performance value in the IC-100 CCM loop with the IAE value 1173,77 for the reduction of power set point test, and the IAE value 1178,62 for the increase of power set point test, whereas for the max. overshoot value obtained 0,263% for the reduction of power set point test and value of max. overshoot 0,67% for the increase of power set point test, then the value obtained settling time of 21 minutes for the reduction of power set point test, and the obtained value of settling time is 19 minutes for the increase of power set point test.

Keywords: Boiler-turbine, IMC-PID, Coordinated Control Mode

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji dan syukur kepada Allah SWT Yang Maha Agung. Atas berkah, petunjuk, dan rahmat-Nya penulis mampu melaksanakan dan menyelesaikan tugas akhir yang berjudul **“*Tuning* Kontroller PID pada Boiler-Turbin Berdasarkan Strategi Kontrol Terkoordinasi”**

Tugas akhir ini disusun guna memenuhi persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama menyelesaikan tugas akhir ini penulis telah banyak mendapatkan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA, selaku rektor ITS – Surabaya
2. Bapak Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA selaku ketua Jurusan Teknik Fisika, FTI – ITS
3. Bapak Ir. Yaumar selaku kepala laboratorium Rekayasa Instrumentasi.
4. Bapak Totok Ruki Biyanto, Ph.D selaku pembimbing tugas akhir atas segala ilmu dan bimbingan yang diberikan.
5. Bapak Hendra Cordova, ST. M.T, selaku dosen wali yang selalu memberikan perhatiannya selama penulis menjadi mahasiswa di Jurusan Teknik Fisika.
6. Bapak dan Ibu dosen Teknik Fisika yang telah banyak memberikan ilmunya sehingga penulis dapat menyelesaikan jenjang kuliah sampai tugas akhir ini.
7. Keluarga tercinta yang telah memberikan doa, motivasi, dan dukungannya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
8. Teman-teman angkatan 2010, dan seluruh mahasiswa jurusan Teknik Fisika – ITS atas bantuan dan dukungannya yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa terdapat beberapa kekurangan dalam tugas akhir ini, tetapi penulis berharap hasil penelitian tugas akhir ini dapat memberikan kontribusi yang berarti dan dapat menambah wawasan bagi pembaca dan mahasiswa Teknik Fisika yang nantinya dapat digunakan sebagai referensi pengerjaan tugas akhir selanjutnya. Semoga hasil penelitian tugas akhir ini banyak memberikan manfaat untuk kemajuan bidang instrumentasi dalam hal pembelajaran mengenai simulasi *tuning* IMC-PID pada *plant* boiler-turbin.

Surabaya, Agustus 2014

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
<i>ABSTRACT</i>	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR SIMBOL	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan	3
1.5 Manfaat	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Strategi Kontrol Boiler-Turbin	5
2.2 Pemodelan FOPDT (<i>First Orde Plud Dead Time</i>)	8
2.3 IMC-PID (<i>Internal Model Control-PID</i>)	9
2.4 <i>Tuning</i> IMC-PID	14
2.5 <i>Tuning</i> Pengendali <i>Feed Forward</i>	16
2.6 Analisa Performansi Pengendali	17
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	19
3.1 Alat dan Bahan	19
3.2 Langkah-Langkah Penelitian	19
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	27
4.1 Analisa <i>Open Loop</i>	27
4.1.1 <i>Boiler Following Mode</i> - BFM	27
4.1.2 <i>Turbine Following Mode</i> - TFM	33
4.1.3 <i>Coordinated Control Mode</i> - CCM	41
4.2 Analisa <i>Close Loop</i>	43
4.2.1 Analisa <i>Close Loop</i> LIC-100	44
4.2.2 Analisa <i>Close Loop</i> TIC-100	52

4.2.3 Analisa <i>Close Loop</i> PIC-100	60
4.2.4 Analisa <i>Close Loop</i> IC-100	68
4.3 Pembahasan	76
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	79
5.1 Kesimpulan	79
5.2 Saran	80
DAFTAR PUSTAKA	81
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar	2.1	Skema <i>Boiler Following Mode</i>	6
Gambar	2.2	Skema <i>Turbine Following Mode</i>	7
Gambar	2.3	Skema <i>Coordinated Control Mode</i>	8
Gambar	2.4	Diagram reaksi proses / <i>process reaction curve</i>	9
Gambar	2.5	Sistem pengendali <i>feedback</i>	9
Gambar	2.6	Sistem pengendali IMC	10
Gambar	2.7	Model alternatif pengendali IMC	10
Gambar	2.8	Diagram blok pengendali <i>feed forward</i> secara sederhana	16
Gambar	2.9	Kurva reaksi proses <i>plant</i> yang akan dipasang pengendali <i>feed forward</i>	16
Gambar	2.10	Kurva reaksi proses <i>disturbance</i> yang akan dipasang pengendali <i>feed forward</i>	17
Gambar	2.11	Analisa karakteristik performansi pengendali	17
Gambar	2.12	Interpretasi IAE pada (a) uji <i>disturbance</i> , dan (b) uji <i>set point</i>	18
Gambar	3.1	<i>Flowchart</i> Penelitian	19
Gambar	3.2	PFD <i>plant</i> boiler-turbin menggunakan HYSYS	20
Gambar	3.3	Struktur pengendali BFM pada HYSYS	22
Gambar	3.4	Struktur pengendali TFM pada HYSYS	22
Gambar	3.5	Struktur pengendali CCM pada HYSYS	23
Gambar	4.1	Grafik <i>open loop</i> LIC-100 BFM	27
Gambar	4.2	Grafik <i>open loop</i> TIC-100 BFM	29
Gambar	4.3	Grafik <i>open loop</i> PIC-100 BFM	31
Gambar	4.4	Grafik <i>open loop</i> IC-100 BFM	32
Gambar	4.5	Grafik <i>open loop</i> LIC-100 TFM	34
Gambar	4.6	Grafik <i>open loop</i> TIC-100 TFM	36

Gambar	4.7	Grafik <i>open loop</i> PIC-100 TFM	38
Gambar	4.8	Grafik <i>open loop</i> IC-100 TFM	40
Gambar	4.9	Grafik <i>open loop feed forward</i> PIC-100 CCM	42
Gambar	4.10	Grafik perbandingan uji penurunan nilai <i>set point</i> LIC-100 sebesar 30% pada BFM, TFM, dan CCM	44
Gambar	4.11	Grafik perbandingan uji penurunan nilai <i>set point</i> LIC-100 sebesar 20% pada BFM, TFM, dan CCM	45
Gambar	4.12	Grafik perbandingan uji penurunan nilai <i>set point</i> LIC-100 sebesar 10% pada BFM, TFM, dan CCM	46
Gambar	4.13	Grafik perbandingan uji kenaikan nilai <i>set point</i> LIC-100 sebesar 10% pada BFM, TFM, dan CCM	48
Gambar	4.14	Grafik perbandingan uji kenaikan nilai <i>set point</i> LIC-100 sebesar 20% pada BFM, TFM, dan CCM	49
Gambar	4.15	Grafik perbandingan uji kenaikan nilai <i>set point</i> LIC-100 sebesar 30% pada BFM, TFM, dan CCM	50
Gambar	4.16	Grafik perbandingan uji penurunan nilai <i>set point</i> TIC-100 sebesar 30% pada BFM, TFM, dan CCM	52
Gambar	4.17	Grafik perbandingan uji penurunan nilai <i>set point</i> TIC-100 sebesar 20% pada BFM, TFM, dan CCM	53
Gambar	4.18	Grafik perbandingan uji penurunan nilai <i>set point</i> TIC-100 sebesar 10% pada BFM, TFM, dan CCM	54
Gambar	4.19	Grafik perbandingan uji kenaikan nilai <i>set point</i> TIC-100 sebesar 10% pada BFM, TFM, dan CCM	56

Gambar	4.20	Grafik perbandingan uji kenaikan nilai <i>set point</i> TIC-100 sebesar 20% pada BFM, TFM, dan CCM	57
Gambar	4.21	Grafik perbandingan uji kenaikan nilai <i>set point</i> TIC-100 sebesar 30% pada BFM, TFM, dan CCM	58
Gambar	4.22	Grafik perbandingan uji penurunan nilai <i>set point</i> PIC-100 sebesar 30% pada BFM, TFM, dan CCM	61
Gambar	4.23	Grafik perbandingan uji penurunan nilai <i>set point</i> PIC-100 sebesar 20% pada BFM, TFM, dan CCM	62
Gambar	4.24	Grafik perbandingan uji penurunan nilai <i>set point</i> PIC-100 sebesar 10% pada BFM, TFM, dan CCM	63
Gambar	4.25	Grafik perbandingan uji kenaikan nilai <i>set point</i> PIC-100 sebesar 10% pada BFM, TFM, dan CCM	64
Gambar	4.26	Grafik perbandingan uji kenaikan nilai <i>set point</i> PIC-100 sebesar 20% pada BFM, TFM, dan CCM	65
Gambar	4.27	Grafik perbandingan uji kenaikan nilai <i>set point</i> PIC-100 sebesar 30% pada BFM, TFM, dan CCM	66
Gambar	4.28	Grafik perbandingan uji penurunan nilai <i>set point</i> IC-100 sebesar 30% pada BFM, TFM, dan CCM	68
Gambar	4.29	Grafik perbandingan uji penurunan nilai <i>set point</i> IC-100 sebesar 20% pada BFM, TFM, dan CCM	69
Gambar	4.30	Grafik perbandingan uji penurunan nilai <i>set point</i> IC-100 sebesar 10% pada BFM, TFM, dan CCM	70
Gambar	4.31	Grafik perbandingan uji kenaikan nilai <i>set point</i> IC-100 sebesar 10% pada BFM, TFM, dan CCM	72

Gambar 4.32	Grafik perbandingan uji kenaikan nilai <i>set point</i> IC-100 sebesar 20% pada BFM, TFM, dan CCM	73
Gambar 4.33	Grafik perbandingan uji kenaikan nilai <i>set point</i> IC-100 sebesar 30% pada BFM, TFM, dan CCM	74

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Aturan <i>tuning</i> IMC-PID berdasarkan model matematis <i>plant</i> pengendalinya	15
Tabel 3.1	<i>Material streams</i> boiler-turbin	21
Tabel 3.2	<i>Energy streams</i> boiler-turbin	21
Tabel 3.3	Nilai <i>range</i> operasi pengendali boiler-turbin	24
Tabel 4.1	Parameter <i>open loop</i> LIC-100 BFM	28
Tabel 4.2	Parameter <i>tuning</i> IMC-PID pada LIC-100 BFM	28
Tabel 4.3	Parameter <i>open loop</i> TIC-100 BFM	30
Tabel 4.4	Parameter <i>tuning</i> IMC-PID pada TIC-100 BFM	30
Tabel 4.5	Parameter <i>open loop</i> PIC-100 BFM	31
Tabel 4.6	Parameter <i>tuning</i> IMC-PID pada PIC-100 BFM	31
Tabel 4.7	Parameter <i>open loop</i> IC-100 BFM	33
Tabel 4.8	Parameter <i>tuning</i> IMC-PID pada IC-100 BFM	33
Tabel 4.9	Parameter <i>open loop</i> LIC-100 TFM	34
Tabel 4.10	Parameter <i>tuning</i> IMC-PID pada LIC-100 TFM	35
Tabel 4.11	Parameter <i>open loop</i> TIC-100 TFM	37
Tabel 4.12	Parameter <i>tuning</i> IMC-PID pada TIC-100 TFM	37
Tabel 4.13	Parameter <i>open loop</i> PIC-100 TFM	39
Tabel 4.14	Parameter <i>tuning</i> IMC-PID pada PIC-100 TFM	39
Tabel 4.15	Parameter <i>open loop</i> IC-100 TFM	40
Tabel 4.16	Parameter <i>tuning</i> IMC-PID pada IC-100 TFM	41
Tabel 4.17	Parameter <i>open loop feed forward</i> PIC-100 TFM	43

Tabel 4.18	Parameter <i>tuning feed forward</i> PIC-100 CCM	43
Tabel 4.19	Analisa parameter <i>close loop</i> uji penurunan <i>set point</i> LIC-100 sebesar 30% pada BFM, TFM, dan CCM	45
Tabel 4.20	Parameter <i>close loop</i> uji penurunan <i>set point</i> LIC-100 sebesar 20% pada BFM, TFM, dan CCM	46
Tabel 4.21	Analisa parameter <i>close loop</i> uji penurunan <i>set point</i> LIC-100 sebesar 10% pada BFM, TFM, dan CCM	47
Tabel 4.22	Analisa parameter <i>close loop</i> uji kenaikan <i>set point</i> LIC-100 sebesar 10% pada BFM, TFM, dan CCM	49
Tabel 4.23	Analisa parameter <i>close loop</i> uji kenaikan <i>set point</i> LIC-100 sebesar 20% pada BFM, TFM, dan CCM	50
Tabel 4.24	Analisa parameter <i>close loop</i> uji kenaikan <i>set point</i> LIC-100 sebesar 30% pada BFM, TFM, dan CCM	51
Tabel 4.25	Analisa parameter <i>close loop</i> uji penurunan <i>set point</i> TIC-100 sebesar 30% pada BFM, TFM, dan CCM	53
Tabel 4.26	Analisa parameter <i>close loop</i> uji penurunan <i>set point</i> TIC-100 sebesar 20% pada BFM, TFM, dan CCM	54
Tabel 4.27	Analisa parameter <i>close loop</i> uji penurunan <i>set point</i> TIC-100 sebesar 10% pada BFM, TFM, dan CCM	55
Tabel 4.28	Analisa parameter <i>close loop</i> uji kenaikan <i>set point</i> TIC-100 sebesar 10% pada BFM, TFM, dan CCM	57
Tabel 4.29	Analisa parameter <i>close loop</i> uji kenaikan <i>set point</i> TIC-100 sebesar 20% pada BFM, TFM, dan CCM	58

Tabel 4.30	Analisa parameter <i>close loop</i> uji kenaikan <i>set point</i> TIC-100 sebesar 30% pada BFM, TFM, dan CCM	59
Tabel 4.31	Analisa parameter <i>close loop</i> uji penurunan <i>set point</i> PIC-100 sebesar 30% pada BFM, TFM, dan CCM	61
Tabel 4.32	Analisa parameter <i>close loop</i> uji penurunan <i>set point</i> PIC-100 sebesar 20% pada BFM, TFM, dan CCM	62
Tabel 4.33	Analisa parameter <i>close loop</i> uji penurunan <i>set point</i> PIC-100 sebesar 10% pada BFM, TFM, dan CCM	63
Tabel 4.34	Analisa parameter <i>close loop</i> uji kenaikan <i>set point</i> PIC-100 sebesar 10% pada BFM, TFM, dan CCM	65
Tabel 4.35	Analisa parameter <i>close loop</i> uji kenaikan <i>set point</i> PIC-100 sebesar 20% pada BFM, TFM, dan CCM	66
Tabel 4.36	Analisa parameter <i>close loop</i> uji kenaikan <i>set point</i> PIC-100 sebesar 30% pada BFM, TFM, dan CCM	67
Tabel 4.37	Analisa parameter <i>close loop</i> uji penurunan <i>set point</i> IC-100 sebesar 30% pada BFM, TFM, dan CCM	69
Tabel 4.38	Analisa parameter <i>close loop</i> uji penurunan <i>set point</i> IC-100 sebesar 20% pada BFM, TFM, dan CCM	70
Tabel 4.39	Analisa parameter <i>close loop</i> uji penurunan <i>set point</i> IC-100 sebesar 10% pada BFM, TFM, dan CCM	71
Tabel 4.40	Analisa parameter <i>close loop</i> uji kenaikan <i>set point</i> IC-100 sebesar 10% pada BFM, TFM, dan CCM	73

Tabel 4.41	Analisa parameter <i>close loop</i> uji penurunan <i>set point</i> IC-100 sebesar 20% pada BFM, TFM, dan CCM	74
Tabel 4.42	Analisa parameter <i>close loop</i> uji kenaikan <i>set point</i> IC-100 sebesar 30% pada BFM, TFM, dan CCM	75

DAFTAR SIMBOL

- u : Parameter *input* pada FOPDT
 K : Parameter *gain* pada FOPDT
 θ : Parameter waktu tunda pada FOPDT
 τ : Parameter *time constant* pada FOPDT
 r : *Input* pengendali IMC & *feedback control*
 c : Parameter pengendali *feedback*
 q : Parameter pengendali IMC dengan filter
 \tilde{q} : Parameter pengendali IMC tanpa filter
 p : Model *real* dari *plant* pengendali IMC dan *feedback control*
 \tilde{p} : Model *internal plant* pengendali IMC
 y : Output pengendali IMC & *feedback control*
 e : *Error* pengendali IMC & *feedback control*
 λ : Parameter *tuning filter* IMC
 f : Parameter *filter* pengendali IMC
 K_c : Parameter *proportional* pengendali PID
 τ_I : Parameter integral pengendali PID
 τ_D : Parameter derivative pengendali PID
 \tilde{p}_+ : Elemen fasa non minimum dari faktor \tilde{p}
 \tilde{p}_- : Elemen fasa minimum dari faktor \tilde{p}

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik saat ini merupakan salah satu kebutuhan pokok bagi manusia karena segala aspek yang menyangkut kegiatan manusia saat ini tidak lepas dari energi listrik. Berdasarkan data energi listrik tahun 2003 – 2011, jumlah konsumsi energi listrik di Indonesia terus mengalami peningkatan rata-rata sebesar 6,86% (PT. PLN, 2011).

Namun selama ini, kebutuhan listrik yang semakin meningkat tidak diiringi dengan peningkatan mutu produksi sehingga banyaknya kebutuhan sumber daya listrik tidak sebanding dengan jumlah daya listrik yang tersedia. Menurut data PT. PLN, jumlah produksi listrik yang tersedia hanya mampu memenuhi 77,82% dari keseluruhan jumlah daya listrik yang dibutuhkan di Indonesia (PT. PLN, 2011).

Adapun cara yang dapat dilakukan untuk menjaga kualitas produksi listrik adalah dengan menerapkan strategi kontrol sesuai kebutuhan dan dengan melakukan *tuning* pengendali secara tepat pada strategi kontrol tersebut. Berdasarkan objek yang dikendalikannya, hal terpenting dalam pengendalian *power plant* atau biasa disebut dengan *front-end control* adalah mengontrol beban turbin generator, dan mengontrol nilai tekanan *steam* yang akan masuk ke turbin generator (Smuts, 2010).

Menurut sejarahnya, mode strategi kontrol boiler-turbin dibuat, dan dikembangkan sekitar tahun 1950 hingga tahun 1970. Beberapa mode strategi kontrol yang telah diterapkan dalam industri pembangkit listrik, antara lain strategi kontrol *Boiler Following Mode* (BFM), *Turbine Following Mode* (TFM), dan *Coordinated Control Mode* (CCM) (Smuts, 2010).

Strategi kontrol *Coordinated Control Mode* (CCM) merupakan mode strategi kontrol yang memiliki keunggulan lebih dibandingkan mode strategi kontrol lainnya, karena mode ini memiliki kecepatan respon layaknya *Boiler Following Mode*

tetapi memiliki stabilitas pengendali seperti *Turbine Following Mode* (Smuts, 2010).

Agar strategi kontrol *Coordinated Control Mode* yang diterapkan pada *plant* boiler-turbin dapat berjalan dengan baik, langkah yang perlu dilakukan adalah melakukan *tuning* pengendali yang tepat untuk menghasilkan respon, dan nilai performansi pengendali yang baik.

Dari berbagai macam metode *tuning* yang ada, *tuning* dengan menggunakan metode IMC-PID memiliki keunggulan dalam hal kestabilan terhadap gangguan pada sistem (Marlin, 2000).

Untuk dapat melakukan simulasi *tuning* pengendali menggunakan metode IMC-PID pada proses produksi listrik boiler-turbin, dibutuhkan *software* pengendali yang mampu merepresentasikan gambaran *real* dari pengendalian proses produksi listrik pada *plant* boiler-turbin. Selain itu, *software* tersebut harus mampu memberikan data yang lengkap pada proses meliputi data *mass balance* dan *heat balance*.

Berdasarkan hal tersebut, simulasi *tuning* pengendali boiler-turbin menggunakan metode IMC-PID pada strategi kontrol *Coordinated Control Mode* (CCM) dilakukan menggunakan *software* Aspen HYSYS. Sebab, di industri *software* tersebut biasa digunakan dalam penelitian, pengembangan model, dan desain (Hamid, 2007).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan sebelumnya, maka permasalahan pada tugas akhir ini adalah :

- a. Bagaimana merancang simulasi *tuning* pengendalian boiler-turbin menggunakan metode IMC-PID berbasis strategi kontrol *Coordinated Control Mode* (CCM).
- b. Bagaimana menganalisa hasil *tuning* pada *loop* pengendali boiler-turbin menggunakan metode IMC-PID berbasis strategi kontrol *Coordinated Control Mode* (CCM).

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada tugas akhir ini antara lain sebagai berikut :

- Objek yang ditinjau pada penelitian ini yaitu *high pressure steam* boiler-turbin.
- Mode strategi kontrol yang digunakan adalah *Coordinated Control Mode* (CCM) dengan pembanding *Boiler Following Mode* (BFM), dan *Turbine Following Mode* (TFM).
- Metode *tuning* pengendali yang digunakan adalah metode IMC-PID
- Tinjauan pengendalian *plant* boiler-turbin meliputi tekanan, dan temperatur pada *superheated steam*, daya listrik pada turbin generator, serta level pada *steam drum*.
- Program yang digunakan untuk melakukan simulasi pada penelitian ini adalah *software* Aspen HYSYS
- Proses yang terjadi pada simulasi boiler-turbin berlangsung sempurna dan tidak terjadi *losses*.

1.4 Tujuan

Adapun tujuan dari tugas akhir ini adalah :

- a. Mendapatkan nilai *tuning* IMC-PID pada rancangan simulasi pengendali boiler-turbin berbasis strategi kontrol *Coordinated Control Mode* (CCM).
- b. Melakukan analisa hasil *tuning* pada *loop* pengendali boiler-turbin menggunakan metode IMC-PID berbasis strategi kontrol *Coordinated Control Mode* (CCM).

1.5 Manfaat

Manfaat tugas akhir ini adalah sebagai bahan pembelajaran, dan sebagai referensi mengenai simulasi *tuning* IMC-PID pada pengendali boiler-turbin berbasis strategi kontrol (*Coordinated Control Mode*) CCM menggunakan *software* Aspen HYSYS.

“Halaman ini memang dikosongkan”

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Strategi Kontrol Boiler - Turbin

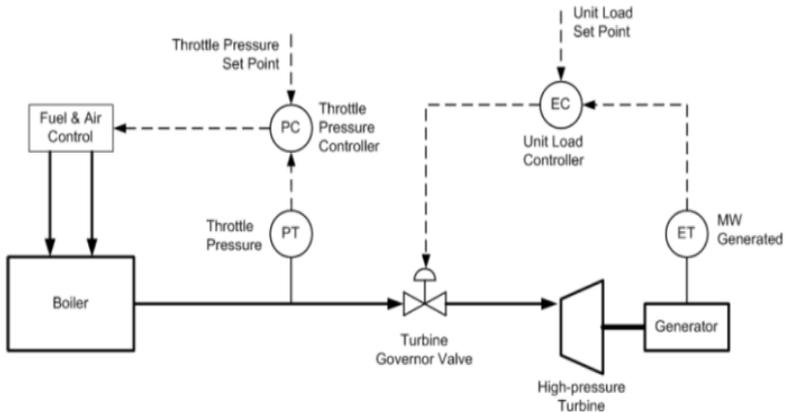
Dasar pengendalian boiler-turbin adalah memproduksi tenaga listrik untuk memenuhi kebutuhan beban dengan menjaga keseimbangan pada proses unit. Pada dasarnya, proses pengendalian yang dilakukan pada pembangkit listrik tenaga uap yaitu mengatur aliran *steam* yang keluar pada boiler menuju *inlet* turbin, dan mengatur beban listrik yang dibutuhkan oleh turbin generator (Quazza & Ferrari dalam Ramirez, 2001).

Penelitian tentang strategi *control* pada sistem boiler-turbin telah diteliti pada akhir tahun 1960-an, dan terdapat tiga mode strategi kontrol yang telah dibuat, serta diaplikasikan di industri *power plant*. Adapun ketiga mode strategi *control* tersebut antara lain sebagai berikut:

- *Boiler Following Mode* (BFM)

Mode strategi pengendali yang pertama kali dibuat dan digunakan di industri adalah *Boiler Following Mode* (BFM) (Gery dalam Ramirez, 2001). Pada mode ini *boiler* menunggu aksi dari turbin untuk menyesuaikan permintaan pembangkit, kemudian *governor valve* akan membatasi aliran *steam* yang akan masuk ke dalam turbin sesuai dengan permintaan beban. Lalu *boiler* mengendalikan perubahan tekanan *steam* dari *set point* digunakan untuk mengendalikan proses pembakaran *boiler* dengan membatasi aliran bahan bakar dan udara masukkan pada ruang bakar.

Kelebihan dari mode ini adalah respon yang cepat pada perubahan beban. Sedangkan, kekurangan dari mode ini yaitu sangat dimungkinkan pada *boiler* terjadi *overshoot*, karena respon boiler memerlukan waktu untuk menyesuaikan dengan repon pada turbin (Ramirez, 2001). Gambar dibawah menunjukkan skema dari *Boiler Following Mode* (BFM).



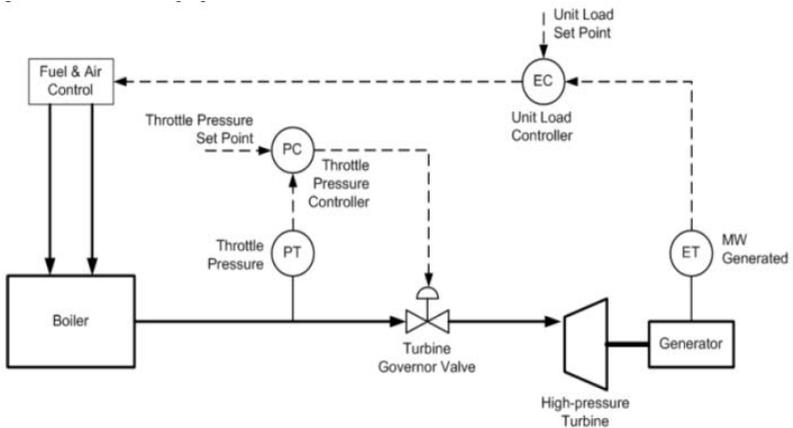
Gambar 2.1 Skema *Boiler Following Mode* (Smuts, 2010).

- *Turbine Following Mode* (TFM)

Strategi kontrol *Turbine Following Mode* (TFM) mulai digunakan pada sekitar akhir tahun 1960-an, dan pada awal tahun 1970-an (Gery dalam Ramirez, 2001). Konsep dari strategi kontrol *Turbine Following Mode* (TFM) yaitu aksi turbin mengikuti aksi dari *boiler* yang disesuaikan dengan permintaan pembangkit.

Pada *Turbine Following Mode* (TFM) permintaan beban digunakan untuk mengendalikan pembakaran *boiler*, dengan cara mengatur aliran udara dan bahan bakar yang memasuki ruang bakar untuk memodifikasi *steam* yang dihasilkan. Kemudian respon dari pengendali turbin menyebabkan pengaturan bukaan pada *governor valve* agar sesuai dengan nilai *set point* tekanan.

Kelebihan dari mode ini adalah respon yang dihasilkan stabil. Meskipun demikian, kekurangan pada mode ini perubahan beban tergantung pada aksi dari boiler, sehingga waktu respon yang dihasilkan lama (Ramirez, 2001). Dibawah ini merupakan skema dari *Turbine Following Mode* (TFM).

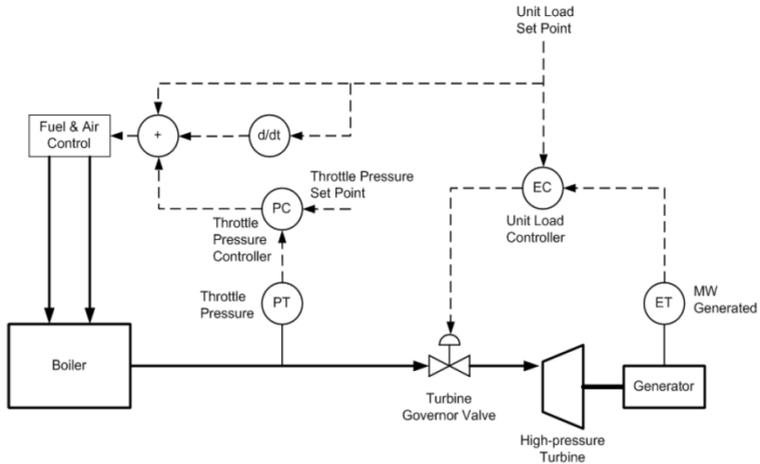


Gambar 2.2 Skema *Turbine Following Mode* (Smuts, 2010).

- *Coordinate Control Mode (CCM)*

Strategi kontrol *Coordinated Control Mode (CCM)* mulai diajukan dan dikembangkan ketika pengendali listrik-hidrolik mulai berkembang, yaitu pada akhir tahun 1960-an (Gery dalam Ramirez, 2001). Pada strategi kontrol *Coordinated Control Mode (CCM)* permintaan daya diberikan secara bersamaan pada pengendali boiler dan turbin.

Selain itu strategi kontrol *Coordinated Control Mode (CCM)* juga mengadopsi kelebihan dan meminimalisasi kekurangan dari strategi kontrol adalah *Boiler Following Mode (BFM)*, dan strategi kontrol *Turbine Following Mode (TFM)* yang telah dijelaskan sebelumnya. Mode ini memiliki stabilitas respon pengendali layaknya *turbine following mode*, namun juga memiliki kecepatan repon seperti halnya *boiler following mode* (Ramirez, 2001). Berikut ini adalah gambar skema strategi kontrol *Coordinated Control Mode (CCM)*.



Gambar 2.3 Skema *Coordinated Control Mode* (Smuts, 2010).

2.2 Pemodelan FOPDT (*First Orde Plus Dead Time*)

Proses dengan waktu tunda / *delay time* dapat dimodelkan dengan bermacam cara, dan dari beberapa macam cara pemodelan yang dipakai akan mempengaruhi nilai dari parameter model, dimana nilai tersebut akan berdampak pada nilai pengendali yang ditentukan dari aturan penyetelan / *tuning rule* (O'Dwyer, 2009).

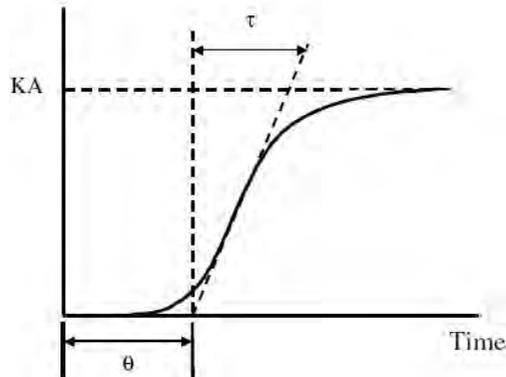
Dalam proses pengendalian dinamika di industri dapat dimodelkan dengan persamaan FOPDT (*First Orde Plus Dead Time*) (Cvjen, 2011). Persamaan (2.14) merupakan persamaan FOPDT dalam domain laplace, dan Persamaan (2.15) adalah persamaan FOPDT dalam domain waktu (Rivera, 2002).

$$\frac{y(s)}{u(s)} = p(s) = \frac{Ke^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (2.1)$$

$$\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = Ku(\theta - t) \quad (2.2)$$

Adapun untuk mendapatkan persamaan diatas dilakukan dengan menggunakan kurva reaksi proses (*process reaction curve*),

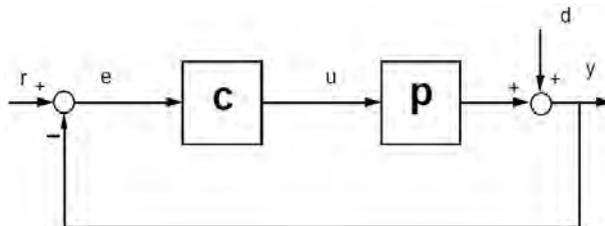
dibawah ini ditunjukkan gambar grafik reaksi proses (*Process Reaction Curve*).



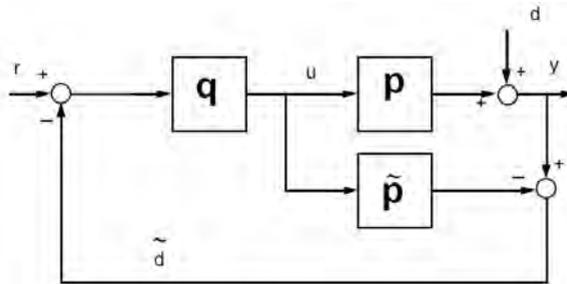
Gambar 2.4 Diagram reaksi proses / *process reaction curve* (Rivera, 2002)

2.3 IMC-PID (*Internal Model Control - PID*)

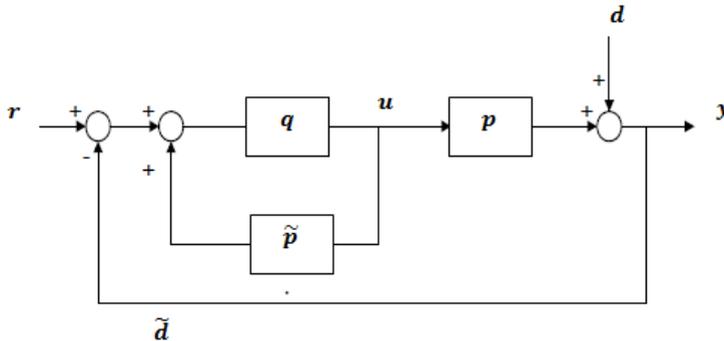
Internal Model Control (IMC) merupakan algoritma yang dapat memodelkan suatu proses secara akurat, dan model tersebut berperan penting dalam mendesain pengendali yang *robust* untuk tujuan stabilitas maupun performansi dari sistem (Coughanour, 1991). Dimana suatu sistem pengendalian yang *robust* adalah sistem pengendalian yang aman pada proses dinamik (Nelles dalam Biyanto, 2006). Berikut adalah gambar sistem pengendali IMC yang diturunkan dari sistem pengendali *feedback*.



Gambar 2.5 Sistem pengendali *feedback* (Rivera, 2002).



Gambar 2.6 Sistem pengendali IMC (Rivera, 2002).



Gambar 2.7 Model alternatif pengendali IMC

Berdasarkan model tersebut, hubungan antar pengendali *feedback* dengan pengendali IMC adalah sebagai berikut (Rivera, 2002).

$$c = \frac{q}{1 - \tilde{p}q} \quad (2.3)$$

$$q = \frac{c}{1 - \tilde{p}c} \quad (2.4)$$

Kemudian dengan memasukkan persamaan pengendali IMC ke dalam persamaan pengendali *feedback*, maka didapatkan hubungan *output* terhadap nilai *set point* dan nilai *disturbance* dari sistem sebagai berikut.

$$y = \frac{pq}{1+q(p-\tilde{p})}r + \frac{1-\tilde{p}q}{1+q(p-\tilde{p})}d \quad (2.5)$$

Untuk kasus special dari model yang sempurna dimana ($p = \tilde{p}$), maka persamaan (2.3) menjadi sebagai berikut.

$$y = \tilde{p}qr + (1 - \tilde{p}q)d \quad (2.6)$$

Pengendali IMC di desain berdasarkan dua langkah yaitu (Rivera, 2002) :

1. Langkah pertama adalah memfaktorkan model \tilde{p} menjadi dua bagian sebagai berikut.

$$\tilde{p} = \tilde{p}_+\tilde{p}_- \quad (2.7)$$

Dimana \tilde{p}_+ adalah semua mencakup semua elemen fasa non minimum seperti RHP (*Right Half Plane zeros*), dan waktu tunda. Sedangkan faktor \tilde{p}_- adalah fasa minimum dan inversibel (Rivera, 2002). Dimana hubungan pengendali IMC dan \tilde{p}_- juga bisa didefinisikan sebagai berikut.

$$\tilde{q} = \frac{1}{\tilde{p}_-} \quad (2.8)$$

2. Menambahkan pengendali q dengan filter $f(s)$ sehingga :

$$q = \tilde{q}f(s) \quad (2.9)$$

Dimana parameter filter $f(s)$ sebagai berikut

$$f(s) = \frac{1}{(\lambda s + 1)^n} \quad (2.10)$$

Dimana λ merupakan satu parameter pengendali yang dibutuhkan oleh pengendali IMC agar dapat menjadi

pengendali yang cukup *robust* untuk gangguan *load* dan *set point* (Biyanto, 2006).

Dengan memasukkan persamaan (2.7), dan (2.9) ke dalam persamaan (2.6) maka persamaan *close loop* pengendali menjadi sebagai berikut.

$$y = \tilde{p}_+ \tilde{p}_- \tilde{q} f r + (1 - \tilde{p}_+ \tilde{p}_- \tilde{q} f) d \quad (2.11)$$

Untuk mendapatkan hubungan IMC dengan pengendali PID maka terlebih dahulu persamaan FOPDT (2.1) dijadikan sebagai nilai \tilde{p} dimasukkan ke persamaan (2.7). Maka persamaan \tilde{p} menjadi.

$$\tilde{p} = \frac{K e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (2.12)$$

Diketahui persamaan pendekatan Pade 1/1 sebagai berikut (Seborg, dkk, 2004).

$$e^{-\theta s} = \frac{1 - \frac{\theta}{2}s}{1 + \frac{\theta}{2}s} \quad (2.13)$$

Sehingga, persamaan \tilde{p} menjadi sebagai berikut

$$\tilde{p} = \frac{K \left(1 - \frac{\theta}{2}s\right)}{\left(1 + \frac{\theta}{2}s\right)(\tau s + 1)} \quad (2.14)$$

Faktorkan persamaan (2.14) dimana didapatkan

$$\tilde{p}_+ = 1 - \frac{\theta}{2}s \quad (2.15)$$

$$\tilde{p}_- = \frac{K}{\left(1 + \frac{\theta}{2}s\right)(\tau s + 1)} \quad (2.16)$$

Lalu persamaan (2.16) dimasukkan kedalam persamaan (2.8), maka didapatkan persamaan sebagai berikut

$$\tilde{q} = \frac{\left(1 + \frac{\theta}{2}s\right)(\tau s + 1)}{K} \quad (2.17)$$

Kemudian dimasukkan persamaan (2.17), dan persamaan (2.10) ke dalam persamaan (2.9), dimana nilai $n = 1$, karena persamaan *plant* merupakan persamaan orde 1. Maka didapatkan persamaan pengendali IMC untuk model FOPDT sebagai berikut.

$$q = \frac{\left(1 + \frac{\theta}{2}s\right)(\tau s + 1)}{K(\lambda s + 1)} \quad (2.18)$$

Kemudian dari persamaan (2.18) akan didapatkan hubungan nilai *tuning* pengendali IMC dengan rumus ideal pengendali PID pada persamaan (2.19) di bawah ini (O'Dwyer, 2009).

$$q = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s\right) \quad (2.19)$$

Maka dengan memasukkan persamaan (2.19) kedalam persamaan (2.18) didapatkan hubungan nilai K_c , τ_I , dan τ_D pada pengendali IMC sebagai berikut.

$$K_c = \frac{1}{K} \frac{\tau + \frac{\theta}{2}}{\lambda + \frac{\theta}{2}} \quad (2.20)$$

$$\tau_I = \tau + \frac{\theta}{2} \quad (2.21)$$

$$\tau_D = \frac{\tau\theta}{2\tau + \theta} \quad (2.22)$$

2.4 Tuning IMC-PID

Keunggulan aturan *tuning* IMC-PID yaitu hanya dengan satu parameter *tuning* didapatkan nilai performansi dari *loop* tertutup dan *robustness* pada model yang memiliki tingkat akurasi rendah (Morari & Zafiriou, 1989).

Selain itu, kelebihan dari *tuning* IMC-PID adalah dapat menentukan nilai λ pada dua parameter pengendali (pada pengendali IMC-PI) atau pada tiga parameter pengendali (pada pengendali IMC-PID), kemudian nilai PID dihitung berdasarkan parameter tersebut (Coughanour, 1991). Nilai λ tersebut merupakan fungsi dari waktu tunda atau *dead time* (θ) dan konstanta waktu atau *time constant* (τ) dari FOPDT (Morari & Zafiriou, 1989).

Penentuan nilai λ merupakan parameter utama dalam *tuning* IMC-PID, adapun nilai K_c akan menjadi turun ketika nilai λ dinaikkan (Seborg, dkk., 2004). Beberapa aturan mengenai penentuan nilai λ seperti yang telah dipulibasikan adalah sebagai berikut :

- a. Menurut Rivera dalam Seborg (2004: 307) besar nilai λ seperti pada persamaan (2.23) dan (2.24)

$$\lambda > 0,8 \theta \quad (2.23)$$

$$\lambda > 0,1 \tau \quad (2.24)$$

- b. Menurut Chien dan Fruehauf dalam Seborg (2004:307) besar nilai λ seperti pada persamaan (2.25)

$$\tau > \lambda > \theta \quad (2.25)$$

- c. Menurut Skogestad dalam Seborg (2004:307) besar nilai λ seperti pada persamaan (2.26)

$$\lambda = \theta \quad (2.26)$$

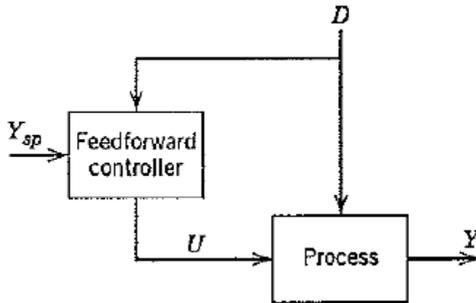
Pengendali IMC-PID juga baik dalam hal *tracking set-point*, tetapi memiliki respon yang lambat terhadap gangguan, khususnya pada proses yang memiliki perbandingan rasio antara waktu tunda dengan konstanta waktu yang rendah (Seborg dkk, 2004). Pada Tabel 2.1 di bawah ini ditunjukkan tabel tuning IMC-PID berdasarkan model matematis *plant* pengendalinya.

Tabel 2.1 Aturan *tuning* IMC-PID berdasarkan model matematis *plant* pengendalinya (Chien dan Fruehauf dalam Seborg dkk, 2004)

Case	Model	$K_c K$	τ_I	τ_D
A	$\frac{K}{\tau s + 1}$	$\frac{\tau}{\tau_c}$	τ	—
B	$\frac{K}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$	$\frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_c}$	$\tau_1 + \tau_2$	$\frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 + \tau_2}$
C	$\frac{K}{\tau^2 s^2 + 2\zeta \tau s + 1}$	$\frac{2\zeta \tau}{\tau_c}$	$2\zeta \tau$	$\frac{\tau}{2\zeta}$
D	$\frac{K(-\beta s + 1)}{\tau^2 s^2 + 2\zeta \tau s - 1}$, $\beta > 0$	$\frac{2\zeta \tau}{\tau_c + \beta}$	$2\zeta \tau$	$\frac{\tau}{2\zeta}$
E	$\frac{K}{s}$	$\frac{2}{\tau_c}$	$2\tau_c$	—
F	$\frac{K}{s(\tau s + 1)}$	$\frac{2\tau_c + \tau}{\tau_c^2}$	$2\tau_c + \tau$	$\frac{2\tau_c \tau}{2\tau_c + \tau}$
G	$\frac{K e^{-\theta s}}{\tau s + 1}$	$\frac{\tau}{\tau_c + \theta}$	τ	—
H	$\frac{K e^{-\theta s}}{\tau s - 1}$	$\frac{\tau - \frac{\theta}{2}}{\tau_c + \frac{\theta}{2}}$	$\tau + \frac{\theta}{2}$	$\frac{\tau \theta}{2\tau + \theta}$
I	$\frac{K(\tau_3 s + 1)e^{-\theta s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$	$\frac{\tau_1 + \tau_2 - \tau_3}{\tau_c - \theta}$	$\tau_1 + \tau_2 - \tau_3$	$\frac{\tau_1 \tau_2 (\tau_1 + \tau_2 - \tau_3) \tau_3}{\tau_1 + \tau_2 - \tau_3}$
J	$\frac{K(\tau_3 s + 1)e^{-\theta s}}{\tau^2 s^2 + 2\zeta \tau s + 1}$	$\frac{2\zeta \tau - \tau_3}{\tau_c + \theta}$	$2\zeta \tau - \tau_3$	$\frac{\tau^2 - (2\zeta \tau - \tau_3) \tau_3}{2\zeta \tau - \tau_3}$
K	$\frac{K(-\tau_3 s + 1)e^{-\theta s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s - 1)}$	$\frac{\tau_1 + \tau_2 + \frac{\tau_3 \theta}{\tau_c + \tau_3 + \theta}}{\tau_c + \tau_3 + \theta}$	$\tau_1 + \tau_2 + \frac{\tau_3 \theta}{\tau_c + \tau_3 + \theta}$	$\frac{\tau_3 \theta}{\tau_c + \tau_3 + \theta} + \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 - \tau_2 - \frac{\tau_3 \theta}{\tau_c - \tau_3 + \theta}}$
L	$\frac{K(-\tau_3 s + 1)e^{-\theta s}}{\tau^2 s^2 + 2\zeta \tau s + 1}$	$\frac{2\zeta \tau + \frac{\tau_3 \theta}{\tau_c + \tau_3 + \theta}}{\tau_c + \tau_c - \theta}$	$2\zeta \tau + \frac{\tau_3 \theta}{\tau_c + \tau_3 + \theta}$	$\frac{\tau_3 \theta}{\tau_c + \tau_3 + \theta} + \frac{\tau^2}{2\zeta \tau + \frac{\tau_3 \theta}{\tau_c + \tau_3 + \theta}}$
M	$\frac{K e^{-\theta s}}{s}$	$\frac{2\tau_c + \theta}{(\tau_c + \theta)^2}$	$2\tau_c + \theta$	—
N	$\frac{K e^{-\theta s}}{s}$	$\frac{2\tau_c + \theta}{\left(\tau_c + \frac{\theta}{2}\right)^2}$	$2\tau_c + \theta$	$\frac{\tau_c \theta + \frac{\theta^2}{4}}{2\tau_c + \theta}$
O	$\frac{K e^{-\theta s}}{s(\tau s + 1)}$	$\frac{2\tau_c - \tau + \theta}{(\tau_c - \theta)^2}$	$2\tau_c + \tau - \theta$	$\frac{(2\tau_c + \theta) \tau}{2\tau_c + \tau + \theta}$

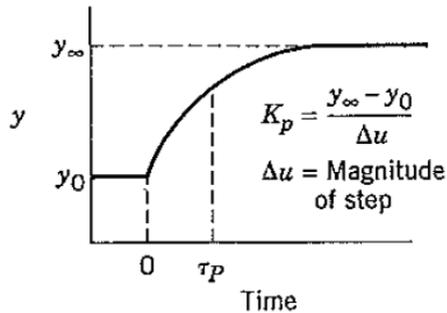
2.5 Tuning Pengendali *Feed Forward*

Konsep dasar dari tuning pengendali *feed forward* adalah untuk mengukur variabel *disturbance*, dan melakukan aksi koreksi terhadap *disturbance* sebelum terjadi gangguan pada proses (Seborg, 2004). Pada gambar di bawah ini ditunjukkan diagram pengendali *feed forward* secara sederhana.

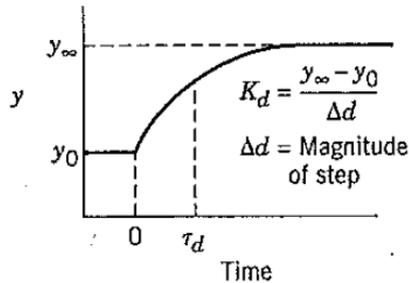


Gambar 2.8 Diagram blok pengendali *feed forward* secara sederhana (Seborg dkk, 2004)

Dalam melakukan *tuning* pengendali *feed forward*, parameter yang harus ditentukan adalah parameter K_f , τ_p , dan τ_d . Parameter tersebut didapatkan melalui kurva reaksi proses dari *plant* seperti pada Gambar 2.9, dan dari kurva reaksi proses *disturbance* seperti pada Gambar 2.10.



Gambar 2.9 Kurva reaksi proses *plant* yang akan dipasang pengendali *feed forward* (Seborg dkk, 2004)



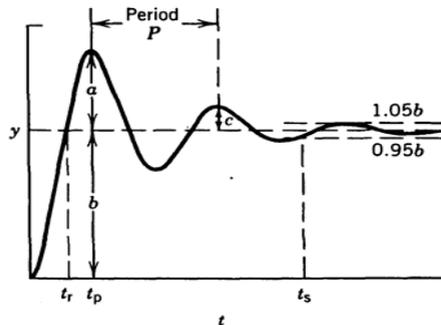
Gambar 2.10 Kurva reaksi proses *disturbance* yang akan dipasang pengendali *feed forward* (Seborg dkk, 2004)

Adapun nilai K_f merupakan parameter *gain* pengendali *feed forward* yang dihitung melalui persamaan (2.18) berikut (Seborg dkk, 2004).

$$K_f = \frac{K_d}{K_t K_v K_p} \quad (2.18)$$

2.6 Analisa Performansi Pengendali

Analisa performansi pengendali merupakan analisa yang dilakukan secara kuantitatif untuk memperoleh nilai performansi dari pengendali. Pada Gambar 2.11 ditunjukkan parameter-parameter yang digunakan dalam melakukan analisa performansi pengendali.



Gambar 2.11 Analisa karakteristik performansi pengendali (Seborg dkk, 2004)

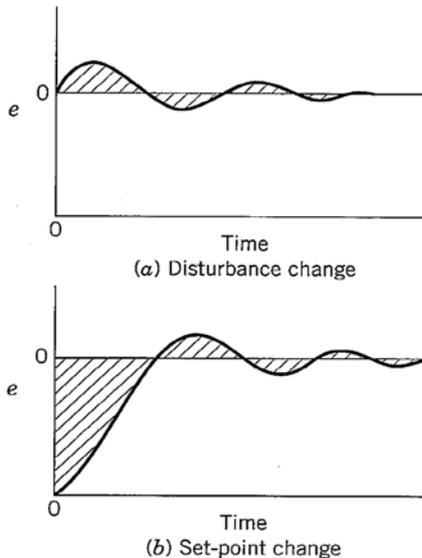
Berdasarkan gambar 2.11 di atas, parameter yang dibutuhkan dalam melakukan analisa performansi pengendali antara lain (Seborg dkk, 2004):

- Nilai *settling time* (t_s), waktu saat *output* proses mencapai lebar pita $\pm 5\%$ dari perubahan total *output* proses.
- *Maximum overshoot*, dengan perhitungan nilai sebagai berikut.

$$OS = \frac{a}{b} \times 100\% \quad (2.18)$$

- Nilai IAE (*Integral Absolute Error*) adalah penjumlahan nilai *absolute error* dari *output* proses, nilai IAE di interpretasikan pada area yang diarsir seperti pada Gambar 2.12 di bawah. Nilai IAE dihitung seperti pada persamaan (2.19) berikut.

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (2.19)$$



Gambar 2.12 Interpretasi IAE pada (a) uji *disturbance*, dan (b) uji *set point* (Seborg dkk, 2004)

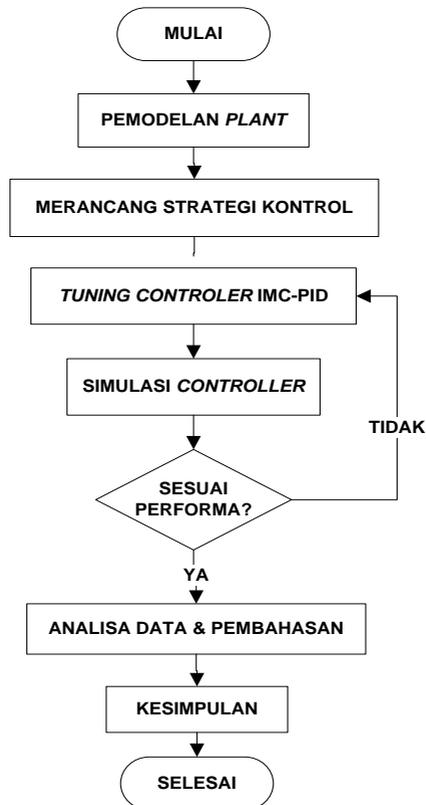
BAB III METODOLOGI

3.1 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada tugas akhir ini berupa *software* Aspen HYSYS 7.3 sebagai simulator *tuning* pengendali, dan digunakan pula *Microsoft Excel* 2010 untuk pengolahan data.

3.2 Langkah-Langkah Penelitian

Langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian tugas akhir ini seperti pada *flowchart penelitian* pada Gambar 3.1.

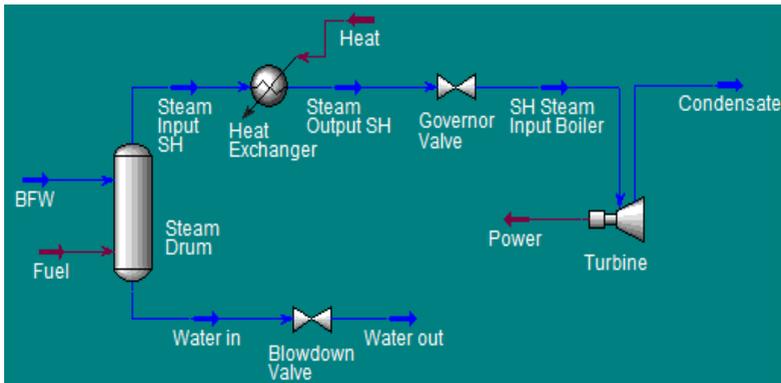


Gambar 3.1 *Flowchart* Penelitian

Berdasarkan *flowchart* seperti pada Gambar 3.1 di atas, maka berikut ini penjelasan mengenai langkah-langkah yang dilakukan pada penelitian:

a. **Pemodelan *Plant***

Pemodelan *plant* dilakukan untuk membuat gambaran dari sistem yang akan disimulasikan, adapun model *plant* boiler-turbin yang dijadikan objek pada penelitian ini merupakan bentuk sederhana dari PFD pembangkit listrik di PT. Semen Gresik (Persero). Dan objek simulasi yang ditinjau dimulai dari proses produksi *high pressure steam* pada *boiler* hingga produksi listrik pada turbin generator. Berikut ditunjukkan skema PFD dari *plant* boiler-turbin yang akan disimulasikan menggunakan *software* Aspen HYSYS seperti pada Gambar 3.2 di bawah.



Gambar 3.2 PFD *plant* boiler-turbin menggunakan HYSYS

Setelah rancangan simulasi *plant high pressure steam* boiler-turbin dibuat menggunakan *software* Aspen HYSYS sesuai dengan skema di atas, selanjutnya data laju aliran massa dan energi dimasukkan terlebih dahulu, data-data tersebut dimasukkan pada *material streams*, dan *energy streams*. Pada tabel 3.1, dan tabel 3.2 di bawah ini ditunjukkan nilai *material stream*, dan *energy stream* yang diambil dari data di PT.Semen Gresik (persero) pada sistem *high pressure steam* boiler-turbin.

Tabel 3.1 *Material streams* boiler-turbin (PT. ITS Kemitraan, 2013)

<i>Material Streams</i>	<i>Temperature (°C)</i>	<i>Pressure (MPa)</i>	<i>Mass Flow (kg/h)</i>
<i>Boiler Feed Water</i>	219,6	5	60.420
<i>Steam Input Superheater</i>	263,9	5	19.340
<i>Steam Output Superheater</i>	500	5	19.340
<i>Steam Input Turbine</i>	489,2	1,905	19.340
<i>Condensate</i>	207,2	0,1258	19.340
<i>Blowdown Water</i>	219,6	2,3	41.080

Tabel 3.2 *Energy streams* boiler-turbin (PT. ITS Kemitraan, 2013)

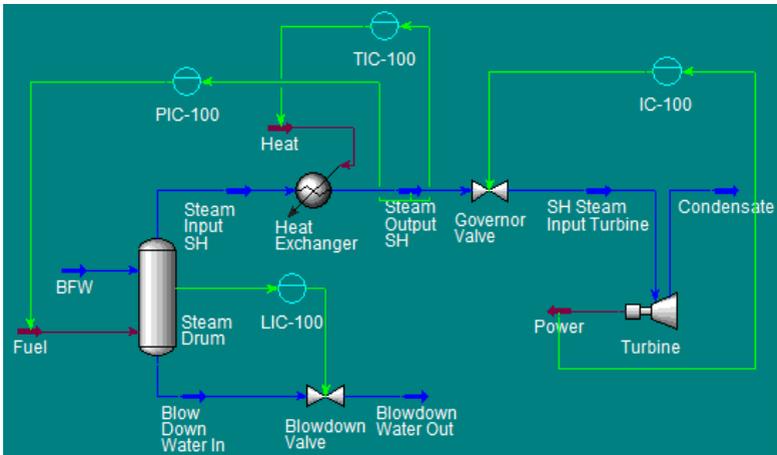
<i>Energy Streams</i>	<i>Satuan</i>	<i>Nilai</i>
<i>Heat</i>	Kcal/h	2.958.000
<i>Fuel</i>	Kcal/h	11.000.000
<i>Power</i>	kW	3000

b. Merancang Strategi Kontrol

Setelah *plant* dimodelkan, langkah selanjutnya adalah melakukan perancangan strategi kontrol dengan menggunakan *software* HYSYS. Ketiga jenis mode strategi kontrol yang digunakan meliputi :

- *Boiler Following Mode* (BFM)

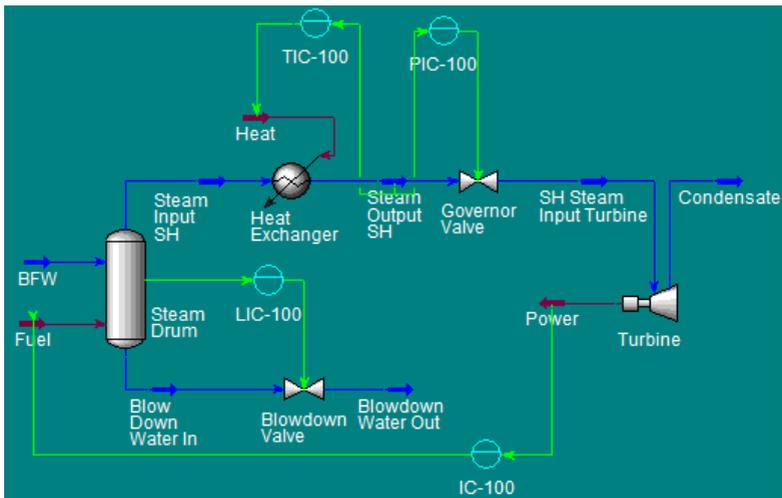
Berikut ditunjukkan rancangan strategi kontrol *Boiler Following Mode* (BFM) menggunakan *software* Aspen HYSYS seperti pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Struktur pengendali BFM pada HYSYS

- *Turbine Following Mode (TFM)*

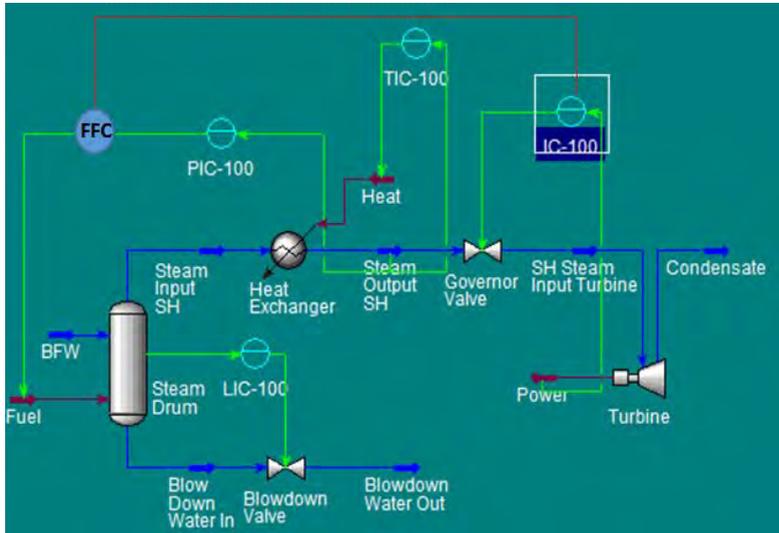
Berikut rancangan strategi kontrol *Turbine Following Mode* (TFM) menggunakan *software* Aspen HYSYS seperti pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Struktur pengendali TFM pada HYSYS

- *Coordinated Control Mode (CCM)*

Berikut rancangan strategi kontrol *Coordinated Control Mode (CCM)* menggunakan *software* Aspen HYSYS seperti pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Struktur pengendali CCM pada HYSYS

Ketiga rancangan strategi kontrol BFM, TFM, dan CCM tersebut dibuat sesuai dengan skema struktur pengendali pada Gambar 2.1, Gambar 2.2, dan Gambar 2.3. Adapun *loop* pengendali yang disimulasikan, dan dijadikan objek penelitian ini terdiri dari:

- *Loop* pengendali tekanan *output steam drum* (PIC-100)
- *Loop* pengendali daya listrik turbin generator (IC-100)
- *Loop* pengendali temperatur *superheated steam* (TIC-100)
- *Loop* pengendali level *steam drum* (LIC-100)

Kemudian keempat *loop* pengendali pada strategi kontrol yang telah dirancang tersebut dibuat *range* operasi pengendalinya seperti ditunjukkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Nilai *range* operasi pengendali boiler-turbin

Parameter Pengendali	Satuan	Range Operasi	
		Minimum	Maksimum
PIC-100	MPa	0	10
LIC-100	% Level	0	100
IC-100	kW	0	10.000
TIC-100	°C	0	1.000
<i>Heat of Superheater</i>	kcal / h	0	10.000.000
<i>Heat of Combustion Fuel</i>	kcal / h	0	100.000.000
<i>Governor Valve</i>	% Buka	0	100
<i>Blowdown Valve</i>	% Buka	0	100

c. Tuning Controller IMC-PID

Setelah perancangan strategi kontrol boiler-turbin dibuat, maka selanjutnya pengendali tersebut dilakukan *tuning* agar menghasilkan sistem pengendali yang baik sesuai dengan yang diinginkan. Pada tugas akhir ini metode *tuning* yang digunakan adalah metode IMC-PID, dan untuk mode *coordinated control* dilakukan pula *tuning* pengendali *feed forward*. Adapun tahapan dalam melakukan *tuning* IMC-PID dengan menggunakan persamaan FOPDT adalah sebagai berikut :

- a. Mendapatkan kurva reaksi proses *open loop* untuk *loop* pengendali LIC-100, TIC-100, PIC-100, dan IC-100 pada sistem boiler-turbin
- b. Menentukan nilai parameter *open loop* dari masing-masing *loop* pengendali menggunakan persamaan FOPDT (2.14) dan dimasukkan pada Tabel 1 seperti dalam lampiran.

- c. Menentukan parameter λ dengan ketentuan seperti pada persamaan (2.17), (2.18), atau pada persamaan (2.19), atau pada persamaan (2.20)
- d. Mencari nilai parameter pengedali IMC-PID meliputi nilai K_C , τ_I , dan τ_D menggunakan tabel IMC-PID seperti ditunjukkan pada Gambar 2.7
- e. Setelah semua data meliputi parameter model FOPDT, dan IMC-PID dari loop pengendali level, temperatur, tekanan, dan daya telah didapat, maka semua data tersebut dimasukkan pada Tabel 2 seperti dalam lampiran.
- f. Kemudian pada strategi kontrol *Coordinated Control Mode* (CCM), parameter FOPDT dan nilai *tuning* IMC-PID yang digunakan seperti pada nilai BFM, kemudian dilakukan *tuning* pengendali *feed forward* meliputi pengukuran nilai K_f , K_d , K_p , τ_p , dan τ_d . Dimana pada HYSYS, parameter τ_p dituliskan τ_1 , dan parameter τ_d diberikan pada τ_2 . Kemudian nilai *tuning* hasil *feed forward* yang didaatkan dari strategi kontrol CCM dimasukkan pada Tabel 3 seperti dalam lampiran.

d. Simulasi Controller IMC-PID

Setelah dilakukan *tuning* pada ketiga jenis strategi kontrol boiler-turbin, langkah selanjutnya melakukan uji *tracking set point* pada ketiga pengendali tersebut. Uji yang dilakukan meliputi uji kenaikan dan penurunan nilai *set point* sebesar $\pm 30\%$, $\pm 20\%$, $\pm 10\%$, dari nilai awal yang telah ditentukan pada *loop* pengendali tekanan *output steam drum* (PIC-100), *loop* pengendali temperatur *superheated steam* (TIC-100), *loop* pengendali *level steam drum* (LIC-100), dan pada *loop* pengendali daya listrik turbin generator (IC-100). Setelah dilakukan uji *set point*, data dari uji tersebut dibuat grafik respon pengendalinya, dan dianalisa hasil uji *set point* pada semua *loop* pengendali dari strategi pengendali BFM, TFM, dan CCM.

e. Analisa Data dan Pembahasan

Data hasil uji *set point* IC-100, TIC-100, PIC-100, dan LIC-100 pada strategi kontrol *Boiler Following Mode* (BFM), *Turbine*

Following Mode (TFM), dan *Coordinated Control Mode* (CCM) terlebih dahulu dibuat grafik kurva respon pengendali nya. Kemudian dari kurva respon pengendali, dan data tersebut, dilakukan analisis performansi pengendali meliputi perhitungan nilai *settling time* dengan ketentuan nilai *output* proses mencapai lebar pita ± 5 , *maximum overshoot* seperti pada persamaan (2.18), dan perhitungan nilai *error* absolut menggunakan IAE seperti pada persamaan (2.19). Setelah itu, data nilai kriteria kuantitatif performansi pengendali tersebut dimasukkan pada Tabel 4 seperti dalam lampiran.

Setelah didapatkan data-data perbandingan nilai performansi pada tiap *loop* dari strategi pengendali BFM, TFM, dan CCM. Kemudian dilakukan pembahasan mengenai hasil simulasi pada tiap *loop* dari ketiga strategi kontrol, dan nilai *tuning* IMC-PID yang didapatkan, beserta hasil perhitungan performansi dari nilai *tuning* tersebut.

f. Kesimpulan

Setelah dilakukan analisa data, dan pembahasan, maka langkah selanjutnya adalah membuat kesimpulan dari hasil penelitian mengenai simulasi *tuning* pengendali boiler-turbin pada strategi kontrol *Coordinated Control Mode* (CCM).

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa *Open Loop*

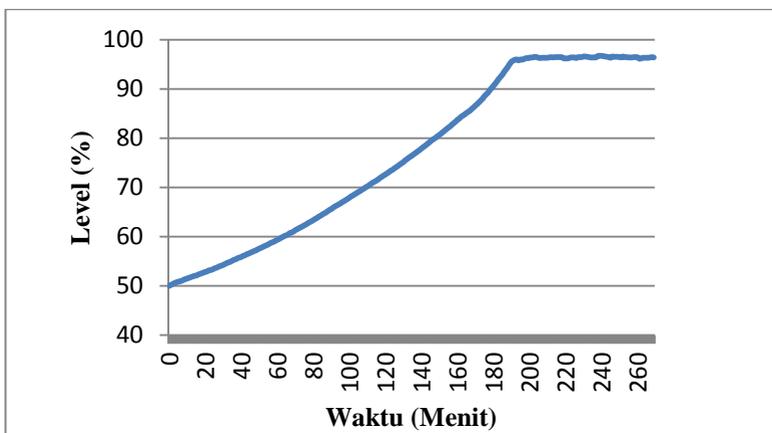
Berikut penjelasan mengenai hasil grafik *open loop* beserta perhitungan nilai *tuning* menggunakan metode IMC-PID yang didapat dari setiap *loop* pengendali pada strategi kontrol BFM, TFM, dan CCM.

4.1.1 *Boiler Following Mode - BFM*

Pada strategi pengendali BFM analisa *open loop* dan nilai *tuning* IMC-PID meliputi *loop* pengendali LIC-100, PIC-100, TIC-100, dan IC-100 seperti dijelaskan dibawah ini.

- **LIC-100 (BFM)**

Uji *open loop* pengendali PIC-100 BFM dilakukan dengan cara mengubah bukaan *blowdown valve* sebesar 5%, dengan besar bukaan awal sebesar 12,84 % menjadi 7,84 %. Dari nilai tersebut, diperoleh perubahan level *steam drum* sebesar 46,79 % dari level awal sebesar 50%, menjadi 96,79 %. Berikut merupakan grafik *open loop* pengendali LIC-100 BFM seperti pada Gambar 4.1 dibawah.



Gambar 4.1 Grafik *open loop* LIC-100 BFM

Dari Gambar 4.1 di atas, grafik pengendali LIC-100 merupakan jenis grafik pengendali orde nol, oleh sebab itu digunakan *case E* tabel *tuning* IMC-PID seperti pada Tabel 2.1. Dan berikut ini ditunjukkan hasil analisa *open loop* serta nilai *tuning* IMC-PID untuk LIC-100 BFM seperti pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2

Tabel 4.1 Parameter *open loop* LIC-100 BFM

Parameter <i>Open Loop</i> LIC-100-BFM	
63,2% Level (%)	79,5679936
$\tau_{\text{LIC-100-BFM}}$ (s)	8749
$\tau_{\text{LIC-100-BFM}}$ (Menit)	145,8166667
$K_{\text{LIC-100-BFM}}$	9,35696

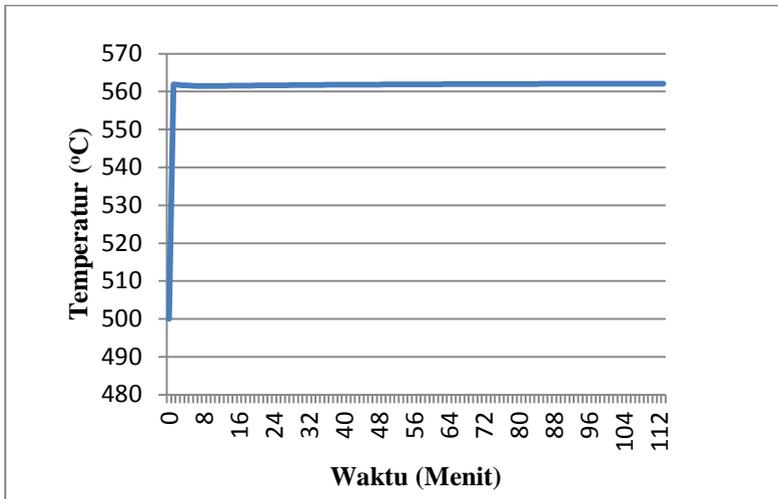
Tabel 4.2 Parameter *tuning* IMC-PID pada LIC-100 BFM

Parameter <i>Tuning</i> LIC-100-BFM	
$\tau_{\text{LIC-100-BFM}}$ (Menit)	145,8166667
$\lambda_{\text{LIC-100-BFM}}$ (Menit)	2
$K_{\text{LIC-100-BFM}}$	9,35696
K_c	0,106872318
τ_I (Menit)	4

Berdasarkan hasil uji open loop dan *tuning* pengendali level BFM pada Tabel 4.1, dan Tabel 4.2 didapatkan nilai waktu konstan sebesar 145,8167 menit, dengan nilai *gain* pengendali sebesar 9,35696. Sehingga dari nilai tersebut dilakukan *tuning* IMC-PID dengan nilai *tuning* λ sebesar 2 menit, dan didapatkan nilai K_c sebesar 0,106872, serta nilai τ_I sebesar 4 menit.

- **TIC-100 (BFM)**

Pada uji *open loop* TIC-100 BFM, laju aliran panas *superheater* yang merupakan parameter *input* pengendali diubah sebesar 500.000 kcal/h, dengan laju aliran panas awal 2.953.000 kcal/h menjadi 3.453.000 kcal/h. Sehingga, dari kenaikan laju aliran panas tersebut menghasilkan parameter *output* berupa perubahan temperatur *superheated steam* sebesar 62,093 °C. Dengan nilai temperatur awal sebesar 500,002 °C diubah menjadi 562,093 °C seperti pada grafik uji *open loop* TIC-100 BFM pada Gambar 4.2 di bawah.



Gambar 4.2 Grafik *open loop* TIC-100 BFM

Berdasarkan hasil uji *open loop* diatas, grafik pengendali TIC-100 BFM tersebut merupakan pengendali orde satu. Oleh sebab itu berdasarkan tabel IMC-PID pada Tabel 2.1, aturan *tuning* yang digunakan seperti pada *case G* atau *case H*. Berikut merupakan hasil perhitungan analisa *open loop*, dan hasil perhitungan nilai *tuning* IMC-PID untuk TIC-100 BFM .

Tabel 4.3 Parameter *open loop* TIC-100 BFM

Parameter Open Loop TIC-100-BFM	
63,2% Temperatur (%)	539,244776
$\tau_{\text{TIC-100-BFM}}$ (s)	38
$\tau_{\text{TIC-100-BFM}}$ (Menit)	0,633333333
$K_{\text{TIC-100-BFM}}$	1,24186

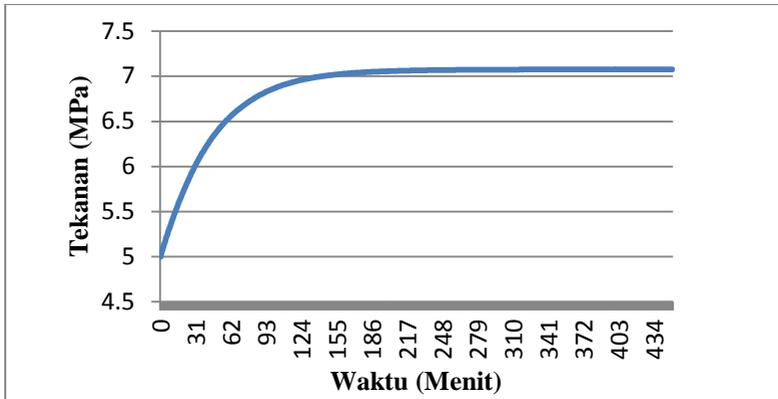
Tabel 4.4 Parameter *tuning* IMC-PID pada TIC-100 BFM

Parameter Tuning TIC-100-BFM	
$\tau_{\text{TIC-100-BFM}}$ (Menit)	0,633333333
$\lambda_{\text{TIC-100-BFM}}$ (Menit)	3,5
$K_{\text{TIC-100-BFM}}$	1,24186
K_c	0,145710773
τ_I (Menit)	0,633333333

Dari Tabel 4.3 dan Tabel 4.4 diketahui nilai waktu konstan untuk pengendali temperatur sebesar 0,63 menit, dengan nilai *gain* sebesar 1,24186. Dari nilai tersebut didapatkan hasil tuning λ IMC-PID sebesar 3,5 menit. Sehingga, dari nilai *tuning* tersebut didapatkan nilai K_c sebesar 0,1457, dan nilai τ_I sebesar 0, 633 menit.

- **PIC-100 (BFM)**

Pada uji *open loop* pengendali PIC-100 BFM, parameter *input* uji *open loop* berupa laju aliran panas pembakaran *boiler*, sedangkan *output* parameter uji pengendali berupa tekanan *steam output boiler*. Nilai laju aliran panas pembakaran diubah sebesar 5.000.000 kcal/h dari nilai laju aliran awal panas pembakaran *boiler* sebesar 10.710.000 kcal/h menjadi 15.710.000. Dari perubahan nilai laju aliran panas pembakaran *boiler* tersebut didapatkan kenaikan nilai tekanan sebesar 2,076 MPa, dengan nilai tekanan awal sebesar 5 MPa menjadi 7,076 MPa seperti pada grafik *open loop* pada Gambar 4.3 di bawah.



Gambar 4.3 Grafik *open loop* PIC-100 BFM

Berdasarkan grafik *open loop* di atas, pengendali PIC-100 BFM merupakan jenis pengendali orde satu seperti halnya TIC-100 BFM, maka aturan *tuning* IMC-PID yang digunakan juga sama seperti halnya pengendali TIC-100 BFM. Pada Tabel 4.5 berikut ditunjukkan parameter *open loop* PIC-100 BFM, dan pada Tabel 4.6 ditunjukkan pula hasil perhitungan *tuning* pengendali PIC-100 BFM.

Tabel 4.5 Parameter *open loop* PIC-100 BFM

Parameter <i>Open Loop</i> PIC-100-BFM	
63,2% Tekanan (%)	6,31170936
$\tau_{\text{PIC-100-BFM}}$ (s)	2701
$\tau_{\text{PIC-100}}$ (Menit)	45,01666667
$K_{\text{PIC-100-BFM}}$	1,383986667

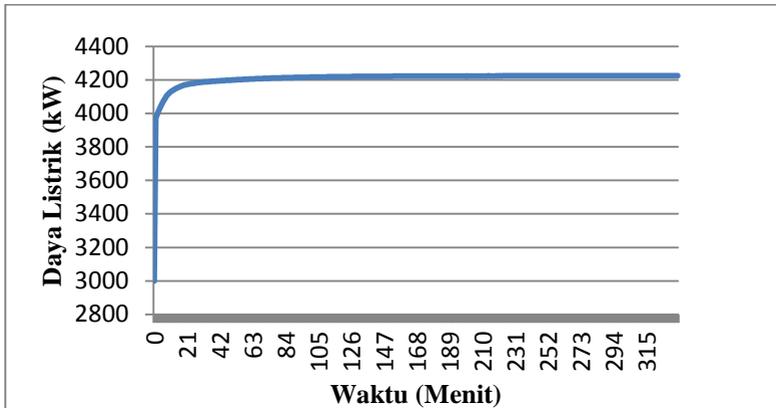
Tabel 4.6 Parameter *tuning* IMC-PID pada PIC-100 BFM

Parameter <i>Tuning</i> PIC-100-BFM	
$\tau_{\text{PIC-100-BFM}}$ (Menit)	45,01666667
$\lambda_{\text{PIC-100-BFM}}$ (Menit)	10
$K_{\text{PIC-100-BFM}}$	1,383986667
K_c	3,252680662
τ_I (Menit)	45,01666667

Berdasarkan Tabel 4.5 dan Tabel 4.6 didapatkan waktu konstan untuk pengendali tekanan sebesar 45,0167 menit, dengan nilai *gain* pengendali sebesar 1,3839867. Dari nilai tersebut didapatkan hasil tuning λ pada IMC-PID sebesar 10 menit. Sehingga, dari nilai tuning didapatkan nilai K_c sebesar 3,25 dan nilai τ_i sebesar 45,0167 menit.

- **IC-100 (BFM)**

Pada uji *open loop* pengendali IC-100 BFM, parameter *input* pengendali yang berupa bukaan *governor valve* dinaikkan sebesar 2,5 % dengan nilai awal bukaan sebesar 7,99 % kemudian diubah menjadi 10,49 %. Berdasarkan perubahan nilai *input* tersebut menghasilkan kenaikan *output* daya listrik sebesar 1224,69 kW, dari nilai daya listrik awal sebesar 2999,55 kW, kemudian nilai daya listrik mengalami kenaikan menjadi 4334,24 kW. Pada Gambar 4.4 berikut ditunjukkan grafik hasil uji *open loop* untuk pengendali IC-100 BFM.



Gambar 4.4 Grafik *open loop* IC-100 BFM

Dari grafik di atas menunjukkan pengendali IC-100 BFM juga merupakan penendali orde satu. Pada Tabel 4.9, dan Tabel 4.10 ditunjukkan hasil analisa *open loop*, dan nilai *tuning* IMC-PID untuk IC-100 BFM

Tabel 4.7 Parameter *open loop* IC-100 BFM

Parameter <i>Open Loop</i> IC-100-BFM	
63,2% Daya (%)	3773,55408
$\tau_{IC-100-BFM}$ (S)	48
$\tau_{IC-100-BFM}$ (Menit)	0,8
$K_{IC-100-BFM}$	4,89876

Tabel 4.8 Parameter *tuning* IMC-PID pada IC-100 BFM

Parameter <i>Tuning</i> IC-100-BFM	
$\tau_{IC-100-BFM}$ (Menit)	0,8
$\lambda_{IC-100-BFM}$ (Menit)	3
$K_{IC-100-BFM}$	4,89876
K_c	0,054435544
τ_1 (Menit)	0,8

Dari Tabel 4.7 dan Tabel 4.8 didapatkan gain pengendali daya listrik sebesar 4,89876 dengan waktu konstan sebesar 0,8 menit. Dari nilai tersebut diperoleh nilai tuning λ IMC-PID sebesar 3 menit, dari nilai tuning tersebut didapatkan nilai K_c sebesar 0,054435 dan nilai τ_1 sebesar 0,8 menit.

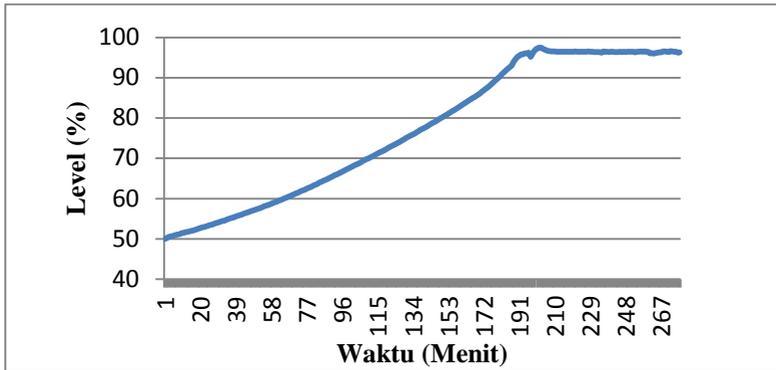
4.1.2 Turbine Following Mode - TFM

Sama halnya seperti strategi kontrol BFM, berikut adalah hasil analisa *open loop* untuk *loop* pengendali LIC-100, TIC-100, PIC-100, dan IC-100 pada strategi kontrol *Turbine Following Mode* (TFM)

- **LIC-100 (TFM)**

Pada uji *open loop* pengendali LIC-100 TFM, parameter *input*, dan parameter *output* uji *open loop* pengendali sama seperti pengendali LIC-100 BFM, di mana parameter *input* pengendali berupa besar bukaan *blowdown valve*, dan parameter *output* pengendali berupa persen level pada *steam drum*.

Besarnya perubahan nilai *input open loop* LIC-100 TFM juga di buat sama seperti LIC-100 BFM sebesar 5%, dengan nilai bukaan awal sebesar 12,84 % menjadi 7,84 %. Namun, dari perubahan nilai *input uji open loop* tersebut menghasilkan kenaikan nilai *output level steam drum* sebesar 47,49%, dengan nilai level awal sebesar 50%, kemudian mengalami kenaikan menjadi 97,49 %. Pada Gambar 4.5 di bawah ini ditunjukkan grafik uji *open loop* pengendali LIC-100 TFM.



Gambar 4.5 Grafik *open loop* LIC-100 TFM

Berdasarkan Gambar 4.5 di atas, sama halnya seperti grafik hasil uji *open loop* pengendali LIC-100 BFM, pengendali LIC-100 TFM juga merupakan pengendali orde nol. Maka aturan *tuning* yang ditetapkan sama seperti halnya pada tuning pengendali IMC-PID pada LIC-100 BFM. Berikut hasil analisa *open loop*, dan nilai *tuning* IMC-PID untuk LIC-100 TFM seperti pada Tabel 4.11 ,dan Tabel 4.12.

Tabel 4.9 Parameter *open loop* LIC-100 TFM

Parameter <i>Open Loop</i> LIC-100-TFM	
63,2% Level (%)	80,0163344
$\tau_{LIC-100-TFM}$ (s)	8887
$\tau_{LIC-100-TFM}$ (Menit)	148,1166667
$K_{LIC-100-TFM}$	9,49884

Tabel 4.10 Parameter *tuning* IMC-PID pada LIC-100 TFM

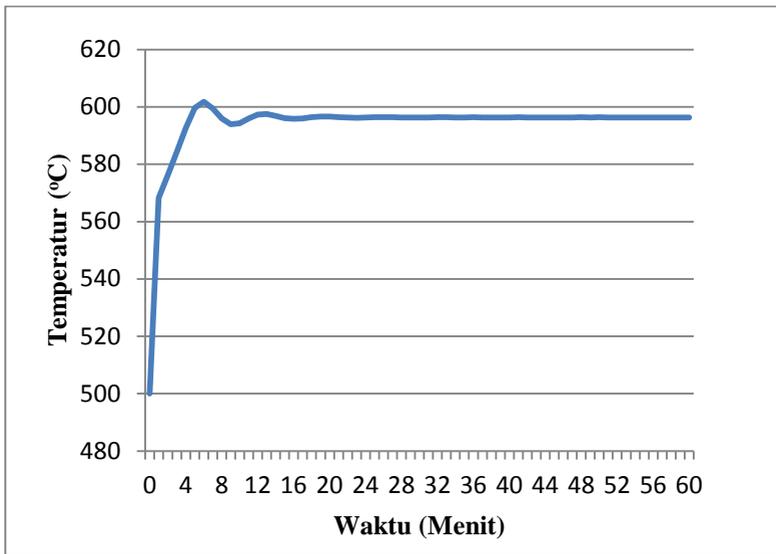
Parameter Tuning LIC-100-TFM	
$\tau_{\text{LIC-100-TFM}}$ (Menit)	148,116667
$\lambda_{\text{LIC-100-TFM}}$ (Menit)	2
$K_{\text{LIC-100-TFM}}$	9,49884
K_c	0,105276013
τ_I (Menit)	4

Berdasarkan Tabel 4.9 dan Tabel 4.10 didapatkan nilai *gain* pengendali level TFM sebesar 9,49884 dengan nilai waktu konstan sebesar 148,11667. Nilai tersebut menunjukkan bahwa nilai *gain* pengendali level TFM lebih besar dari nilai pengendali level BFM, dan nilai time konstan TFM lebih besar dibandingkan time konstan pengendali level BFM. Didapatkan hasil tuning λ antara TFM, dan BFM menghasilkan nilai yang sama sebesar 2 menit. Dari nilai *tuning* tersebut nilai K_c yang didapatkan sebesar 0,105276 dan nilai τ_I sebesar 4 menit. Dari nilai tersebut menunjukkan bahwa nilai proporsional untuk keduanya mendekati, dengan pengendali level untuk BFM menghasilkan K_c lebih besar sedikit, sedangkan nilai τ_I yang dihasilkan untuk keduanya sama. Sehingga dari nilai-nilai tersebut menjelaskan bahwa karakteristik pengendali level antara BFM dan TFM sangat mendekati dan memiliki kesamaan.

- **TIC-100 (TFM)**

Pada uji *open loop* pengendali TIC-100 TFM, parameter *input* dan *output* uji *open loop* pengendali TIC-100 TFM sama halnya dengan parameter TIC-100 BFM, di mana parameter uji *open loop* pengendali merupakan laju aliran panas pada *superheater*, dan parameter output pengendali berupa nilai temperatur pada *superheated steam*. Perubahan nilai *input* uji *open loop* untuk TIC-100 TFM juga sama halnya dengan perubahan nilai uji *open loop* pada pengendali TIC-100 BFM. Dengan perubahan nilai *input* sebesar 500.000 Kcal/h, di mana

nilai awal parameter *input* pengendali / laju aliran panas awal sebesar 2.953.000 Kcal/h, kemudian laju aliran panas tersebut dinaikkan menjadi sebesar 3.453.000 Kcal/h. Kemudian dari perubahan nilai *input* tersebut, didapatkan nilai perubahan *output* atau nilai perubahan temperatur *superheated steam* sebesar 101,812 °C. Di mana nilai awal temperatur *superheated steam* sebesar 500,006 °C, kemudian mengalami kenaikan menjadi 601,818 °C. Pada Gambar 4.6 berikut ditunjukkan grafik *open loop* pengendali TIC-100 TFM.



Gambar 4.6 Grafik *open loop* TIC-100 TFM

Berdasarkan Gambar 4.6 di atas, grafik *open loop* pengendali TIC-100 TFM merupakan grafik pengendali orde satu sama halnya dengan grafik *open loop* pengendali TIC-100 BFM. Sehingga, perhitungan tunng nya mengikuti seperti pada *case G* atau *case H* tabel IMC-PID seperti ditunjukkan pada Tabel 2.1. Berikut ini ditunjukkan hasil analisa *open loop* (seperti pada Tabel 4.13) dan nilai *tuning* IMC-PID untuk TIC-100 TFM (seperti pada Tabel 4.14).

Tabel 4.11 Parameter *open loop* TIC-100 TFM

Parameter <i>Open Loop</i> TIC-100-TFM	
63,2% Temperatur (%)	564,351184
$\tau_{\text{TIC-100-TFM}}$ (s)	57
$\tau_{\text{TIC-100-TFM}}$ (Menit)	0,95
$K_{\text{TIC-100-TFM}}$	2,03624

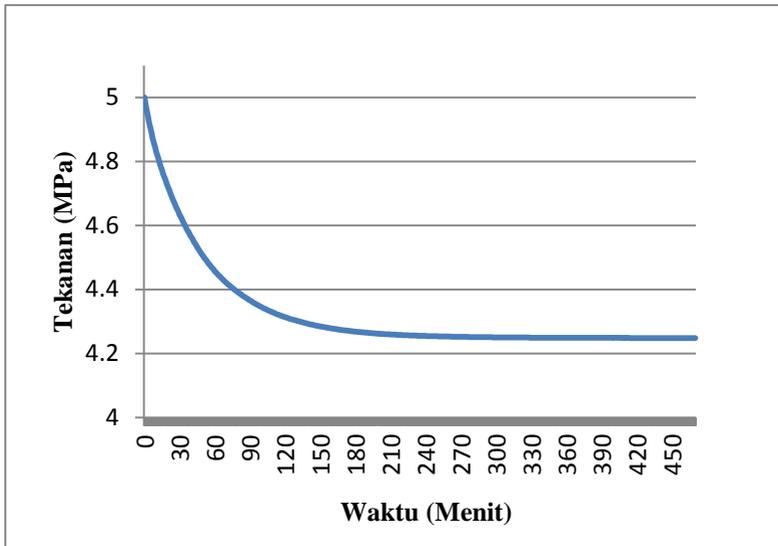
Tabel 4.12 Parameter *tuning* IMC-PID pada TIC-100 TFM

Parameter <i>Tuning</i> TIC-100-TFM	
$\tau_{\text{TIC-100-TFM}}$ (Menit)	0,95
$\lambda_{\text{TIC-100-TFM}}$ (Menit)	3,5
$K_{\text{TIC-100-TFM}}$	2,03624
K_c	0,133298909
τ_I (Menit)	0,95

Berdasarkan Tabel 4.11 dan Tabel 4.12 didapatkan nilai waktu konstan untuk pengendali temperatur TFM sebesar 0,95 menit dengan *gain* pengendali sebesar 2,03624. Nilai tersebut menunjukkan bahwa pengendali temperatur TFM memiliki nilai time konstan, dan nilai gain yang lebih besar dari pada pengendali temperatur untuk strategi kontrol BFM. Dengan nilai tersebut diperoleh nilai tuning λ yang sama seperti antara pengendali BFM dan TFM, yaitu sebesar 3,5 menit. Dari hasil *tuning* tersebut didapatkan nilai K_c sebesar 0,1332989 dan nilai τ_I sebesar 0,95 menit. Berdasarkan nilai tersebut diketahui bahwa nilai K_c pengendali temperatur BFM lebih besar dibandingkan dengan pengendali temperatur TFM, dan nilai τ_I pengendali TFM lebih besar dari pengendali BFM, sehingga pengendali BFM memiliki perubahan kenaikan atau penurunan nilai pengendali yang lebih besar dan memiliki kecepatan yang lebih untuk mencapai nilai *set point* nya dibandingkan TFM.

- **PIC-100 (TFM)**

Pada uji *open loop* PIC-100 TFM, parameter *input* uji berupa bukaan *governor valve*, dan parameter *output* uji berupa nilai tekanan pada *superheated steam*. Uji PIC-100 TFM dilakukan dengan cara mengubah parameter input / besar bukaan *governor valve* sebesar 2 %, dengan *input* awal uji *open loop* sebesar 7,99 % menjadi 9,99 %. Kemudian dari perubahan nilai *input* uji tersebut didapatkan penurunan nilai *output* tekanan *superheated steam* sebesar 0,752 MPa, di mana nilai awal tekanan sebesar 5,001 MPa kemudian turun menjadi 4,249 MPa. Pada Gambar 4.7 di bawah ini ditunjukkan grafik *open loop* pengendali PIC-100 TFM.



Gambar 4.7 Grafik *open loop* PIC-100 TFM

Dari Gambar 4.7 di atas menjelaskan bahwa model *plant* pengendali PIC-100 TFM merupakan pengendali orde satu. Pada Tabel 4.15 dan Tabel 4.16 berikut ditunjukkan hasil analisa *open loop*, dan nilai *tuning* IMC-PID orde satu untuk PIC-100 TFM.

Tabel 4.13 Parameter *open loop* PIC-100 TFM

Parameter Open Loop PIC-100-TFM	
63,2% Tekanan (%)	4,72372816
$\tau_{\text{PIC-100-TFM}}$ (s)	1181
$\tau_{\text{PIC-100-TFM}}$ (Menit)	19,68333333
$K_{\text{PIC-100-TFM}}$	3,7594

Tabel 4.14 Parameter *tuning* IMC-PID pada PIC-100 TFM

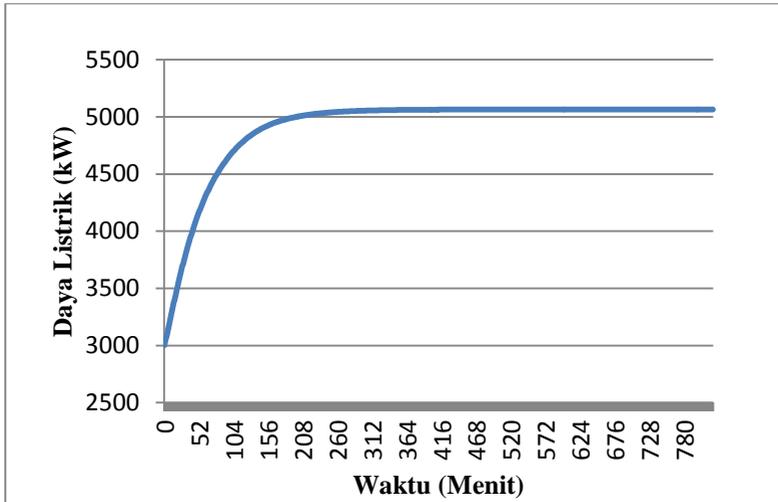
Parameter Tuning PIC-100-TFM	
$\tau_{\text{PIC-100-TFM}}$ (Menit)	19,68333333
$\lambda_{\text{PIC-100-TFM}}$ (Menit)	50
$K_{\text{PIC-100-TFM}}$	3,7594
K_c	0,104715291
τ_1 (Menit)	19,68333333

Dari Tabel 4.13 dan Tabel 4.14 didapatkan nilai time konstan untuk pengendali tekanan TFM sebesar 19,6833 menit dan nilai *gain* nya sebesar 3,7594. Berdasarkan nilai tersebut, nilai waktu konstan TFM lebih rendah, namun memiliki nilai *gain* yang lebih besar daibandingkan pengendali tekanan BFM. Dari nilai tersebut didapatkan *tuning* λ sebesar 50 menit. Dengan nilai *tuning* TFM yang lebih besar dari nilai *tuning* BFM tersebut didapatkan nilai K_c sebesar 0,1047 dan nilai τ_1 sebesar 19,683. Ini menunjukkan bahwa nilai K_c dan nilai τ_1 untuk pengendali tekanan TFM lebih rendah dibandingkan nilai pengendali tekanan BFM. Hal ini menjelaskan bahwa pengendali tekanan TFM lebih cepat dalam mencapai nilai *set point*, namun perubahan kenaikan atau penurunan nilai pengendali lebih kecil dibandingkan pengendali tekanan BFM.

- **IC-100 (TFM)**

Pada uji *open loop* pengendali IC-100 TFM, parameter *input* uji *open loop* berupa laju panas pembakaran *boiler*, dan parameter *output* uji *open loop* merupakan daya listrik turbin generator. Pada uji *open loop* pengendali IC-100 TFM parameter input uji / besar laju aliran panas pembakaran boiler diperbesar sebesar

5.000.000 Kcal/h, dengan nilai awal laju panas pembakaran *boiler* sebesar 10.710.000 Kcal/h, menjadi 15.710.000 Kcal/h. Sehingga dari perubahan input uji tersebut menghasilkan perubahan daya listrik sebesar 2063,77 kW. Di mana nilai awal daya listrik turbin generator sebesar 3000,76 kW, kemudian mengalami kenaikan menjadi 5064,53 kW. Pada Gambar 4.8 berikut ditunjukkan grafik *open loop* pengendali IC-100 TFM.



Gambar 4.8 Grafik *open loop* IC-100 TFM

Berdasarkan Gambar 4.8, hasil uji *open loop* pengendali IC-100 TFM merupakan jenis model pengendali orde satu. Berikut ditunjukkan hasil analisa *open loop*, dan nilai *tuning* IMC-PID untuk IC-100 TFM seperti pada Tabel 4.17, dan Tabel 4.18

Tabel 4.15 Parameter *open loop* IC-100 TFM

Parameter Open Loop IC-100-TFM	
63,2% Daya (%)	4305,06264
$\tau_{IC-100-TFM}$ (s)	3689
$\tau_{IC-100-TFM}$ (Menit)	61,48333333
$K_{IC-100-TFM}$	4,12754

Tabel 4.16 Parameter *tuning* IMC-PID pada IC-100 TFM

Parameter Tuning IC-100-TFM	
$\tau_{IC-100-TFM}$ (Menit)	61,48333333
$\lambda_{IC-100-TFM}$ (Menit)	15
$K_{IC-100-TFM}$	4,12754
K_c	0,99305855
τ_I (Menit)	61,48333333

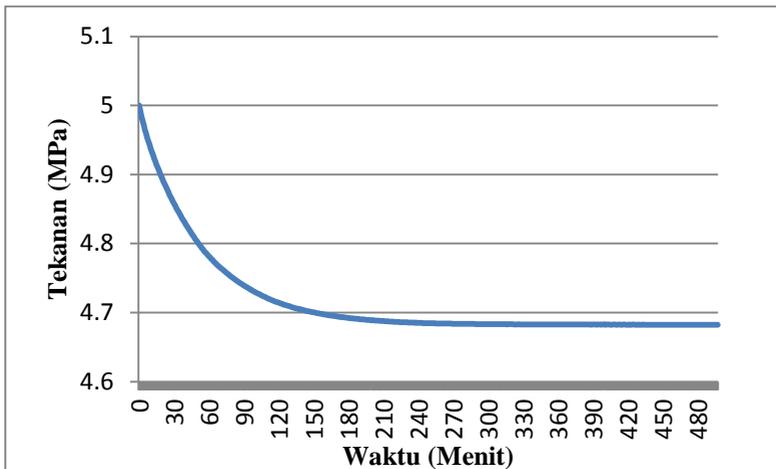
Berdasarkan Tabel 4.15 dan Tabel 4.16 diketahui bahwa waktu konstan untuk pengendali daya listrik TFM sebesar 61,483 menit dengan nilai *gain* nya yaitu 4,12754. Berdasarkan data tersebut diketahui nilai *gain* BFM dan TFM tidak berbeda jauh, dengan *gain* BFM lebih besar dari TFM. Kemudian untuk waktu konstan pengendali daya listrik BFM lebih cepat dibandingkan pengendali listrik TFM. Dari nilai tersebut didapatkan hasil *tuning* λ sebesar 15 menit dengan nilai K_c sebesar 0,993 dan nilai τ_I sebesar 61,483 menit. Berdasarkan nilai tersebut diketahui pengendali listrik BFM lebih cepat dalam mencapai *set point* dibandingkan dengan TFM. Sedangkan untuk perubahan nilai, pengendali listrik TFM lebih besar perubahan kenaikan / penurunannya untuk menuju *set point* dibandingkan pengendali BFM.

4.1.3 Coordinated Control Mode - CCM

Nilai analisa *open loop* dan nilai *tuning* IMC-PID pada strategi pengendali CCM sama halnya seperti pada strategi pengendali BFM, hanya saja pada strategi kontrol CCM *loop* pengendali PIC-100 CCM ditambahkan *tuning* menggunakan *feed forward*. Sehingga *loop* pengendali PIC-100 CCM merupakan pengendali *feedback* + *feedforward*, dimana parameter *tuning feed back control* didapatkan dari nilai *tuning* IMC-PID seperti pada PIC-100 BFM, dan untuk nilai *tuning* pengendali *feed forward* nya didapatkan dari nilai uji *open loop feed back control* PIC-100 BFM (sebagai uji *open loop plant* nya) dan dari uji *open loop feed forward control* PIC-100 CCM (sebagai uji *open loop disturbance* nya) sebagai berikut.

- **Feed Forward PIC-100 (CCM)**

Pada uji *open loop feed forward control* PIC-100 CCM yang dibahas di sini adalah mengenai uji *open loop* untuk parameter *disturbance*, karena hasil nilai *open loop* pengendali *feed forward plant* didapat dari hasil uji *open loop* PIC-100 BFM. Adapun, parameter *disturbance* PIC-100 CCM berupa daya listrik turbin generator. Jadi pada uji *open loop feed forward control* PIC-100 CCM, parameter *input* berupa perubahan bukaan *governor valve* yang merupakan representasi dari perubahan daya listrik turbin generator, kemudian parameter *output* uji *open loop* berupa nilai tekanan *superheated steam*. Pada uji *open loop feed forward control* PIC-100 CCM nilai parameter *input* / daya listrik diubah sebesar 100 kW, dari nilai awal daya listrik sebesar 3000 kW kemudian dinaikkan menjadi 3100 kW. Dari perubahan nilai *input* uji *open loop* tersebut, dihasilkan perubahan parameter *output* uji *open loop* / perubahan penurunan tekanan *superheated steam* sebesar 0,318 MPa. Di mana nilai tekanan *superheated steam* awal sebesar 5 MPa, kemudian turun menjadi 4,682 MPa. Pada Gambar 4.9 di bawah ditunjukkan grafik *open loop feed forward control* PIC-100 CCM.



Gambar 4.9 Grafik *open loop feed forward* PIC-100 CCM

Dari Gambar 4.9 di atas menunjukkan bahwa grafik tersebut merupakan grafik model pengendali orde satu. Dari data uji *open loop disturbance* di atas dan dengan ditambahkan data *gain* (K_{PLANT}) serta data time konstan (τ_{PLANT}) pada uji *open loop* PIC-100 BFM maka didapatkan analisa *open loop* dan nilai *tuning* pengendali *feed forward* PIC-100 CCM sebagai berikut.

Tabel 4.17 Parameter *open loop feed forward* PIC-100 TFM

Parameter Open Loop FF-CCM	
63,2% Tekanan (%)	4,88322168
τ_{FF-CCM} (s)	1364
τ_{FF-CCM} (Menit)	22,73333333
K_{FF-CCM}	3,1774

Tabel 4.18 Parameter *tuning feed forward* PIC-100 CCM

Parameter Tuning FF-PIC-100-CCM	
$\tau_{DISTURBANCE}$ (Menit)	22,73333333
τ_{PLANT} (Menit)	45,01666667
$K_{DISTURBANCE}$	3,1774
K_{PLANT}	1,383986667
K_F (Menit)	2,295831366

Dari Tabel 4.17 dan Tabel 4.18 didapatkan nilai waktu konstan untuk *tuning feed forward disturbance* sebesar 22,73 menit dengan nilai *gain* sebesar 3,1774. Dari hasil tersebut dan dengan ditambahkan hasil *tuning* pengendali tekanan untuk BFM / CCM didapatkan *gain disturbance* lebih besar dibandingkan *gain plant*. Kemudian untuk waktu konstan *tuning plant* lebih besar dibandingkan dengan waktu konstan pada *tuning disturbance*.

4.2 Analisa Close Loop

Berikut penjelasan mengenai analisa *close loop* meliputi grafik hasil uji *close loop* disertai perhitungan nilai IAE, *max.overshoot* (%), dan nilai *settling time* yang didapat dari *loop*

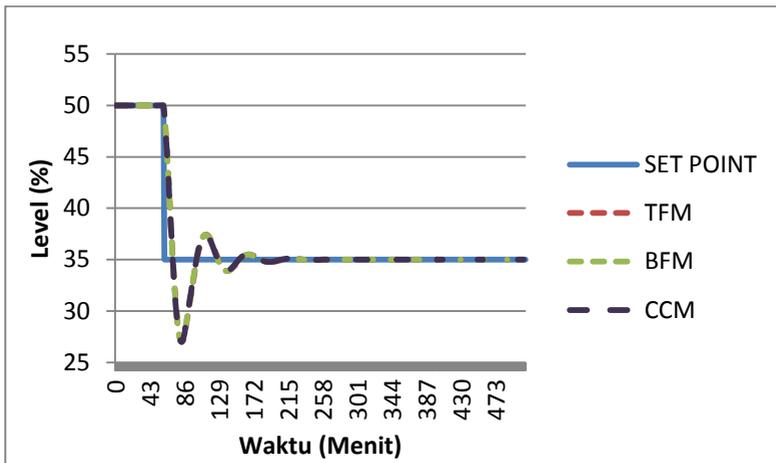
pengendali LIC-100, TIC-100, PIC-100, dan IC-100 pada strategi kontrol BFM, TFM, dan CCM.

4.2.1 Analisa *Close Loop* LIC-100

Berikut analisa *close loop* beserta grafik uji *set point loop* pengendali LIC-100 pada strategi kontrol BFM, TFM, dan CCM. Di mana pada nilai awal sebelum uji, level *steam drum* terlebih dahulu dibuat *steady* pada kondisi level sebesar 50% selama 60 menit kemudian diuji selama 450 menit.

▪ Uji Penurunan *Set Point* LIC-100

Untuk uji penurunan *set point* LIC-100 terbagi dalam tiga uji penurunan yaitu uji penurunan sebesar 30% dengan nilai *set point* level awal 50% kemudian diturunkan menjadi 35% , kemudian uji penurunan sebesar 20% dengan nilai *set point* level awal sebesar 50% kemudian diturunkan menjadi 40%. Lalu uji penurunan *set point* sebesar 10%, dengan nilai awal *set point* level sebesar 50%, kemudian diturunkan menjadi 45%. Berikut uji penurunan nilai *set point* LIC-100 beserta analisa *close loop* pengendalinya.

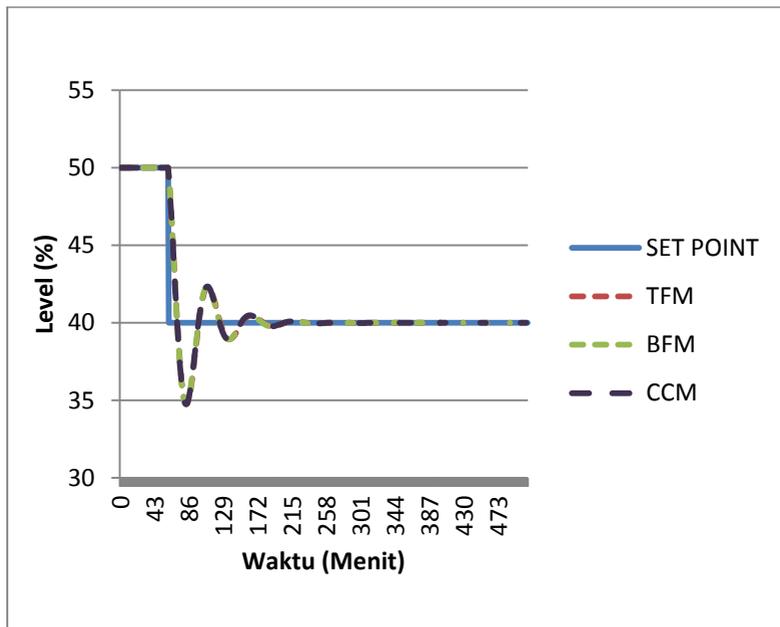


Gambar 4.10 Grafik perbandingan uji penurunan nilai *set point* LIC-100 sebesar 30% pada BFM, TFM, dan CCM

Dari Gambar 4.10 diatas, kemudian pada Tabel 4.19 berikut ditunjukkan hasil analisa parameter *close loop* uji penurunan nilai *set point* LIC-100 sebesar 30%.

Tabel 4.19 Analisa parameter *close loop* uji penurunan *set point* LIC-100 sebesar 30% pada BFM, TFM, dan CCM

Strategi Kontrol	Analisa Performansi Pengendali LIC-100 (-30%)		
	IAE	Max. Overshoot (%)	Settling Time (Menit)
TFM	314,084	3,28	106
BFM	310,240	3,301	105
CCM	310,101	3,309	105

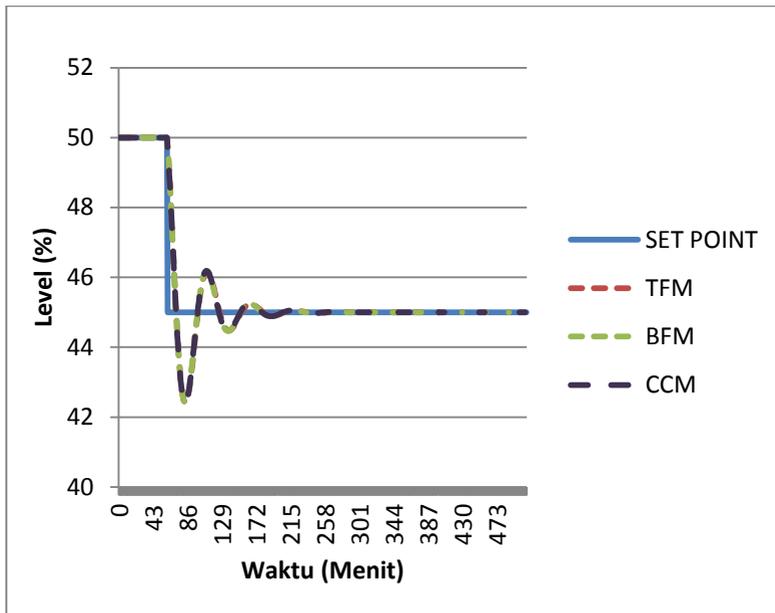


Gambar 4.11 Grafik perbandingan uji penurunan nilai *set point* LIC-100 sebesar 20% pada BFM, TFM, dan CCM

Berdasarkan hasil analisa *close loop* pada Gambar 4.11 diatas. Berikut ditunjukkan hasil analisa parameter *close loop* dari uji penurunan nilai *set point* pada LIC-100 sebesar 20% seperti pada Tabel 4.20 di bawah ini.

Tabel 4.20 Analisa parameter *close loop* uji penurunan *set point* LIC-100 sebesar 20% pada BFM, TFM, dan CCM

Strategi Kontrol	Analisa Performansi Pengendali LIC-100 (-20%)		
	IAE	Max. Overshoot (%)	Settling Time (Menit)
TFM	226,167	4,766	104
BFM	224,354	4,876	103
CCM	224,560	4,902	103



Gambar 4.12 Grafik perbandingan uji penurunan nilai *set point* LIC-100 sebesar 10% pada BFM, TFM, dan CCM

Dari grafik uji *close loop* pada Gambar 4.12, maka berikut ditunjukkan hasil analisa parameter *close loop* dari uji penurunan nilai *set point* pada LIC-100 sebesar 10% seperti pada Tabel 4.21 di bawah.

Tabel 4.21 Analisa parameter *close loop* uji penurunan *set point* LIC-100 sebesar 10% pada BFM, TFM, dan CCM

Strategi Kontrol	Analisa Performansi Pengendali LIC-100 (-10%)		
	IAE	<i>Max. Overshoot</i> (%)	<i>Settling Time</i> (Menit)
TFM	113,422	4,776	105
BFM	112,948	4,938	103
CCM	113,164	4,99	103

Berdasarkan hasil uji penurunan *set point* pengendali LIC-100 didapatkan nilai IAE antara BFM, TFM, dan CCM tidak begitu jauh perbedaannya, artinya ketiga strategi pengendali tersebut tidak memiliki perbedaan yang signifikan dalam mengurangi nilai *error* untuk uji penuruunan *loop* pengendali LIC-100. Dari nilai IAE tersebut didapatkan pula bahwa nilai *error* semakin tinggi dengan bertambahnya uji penurunan nilai *set point*.

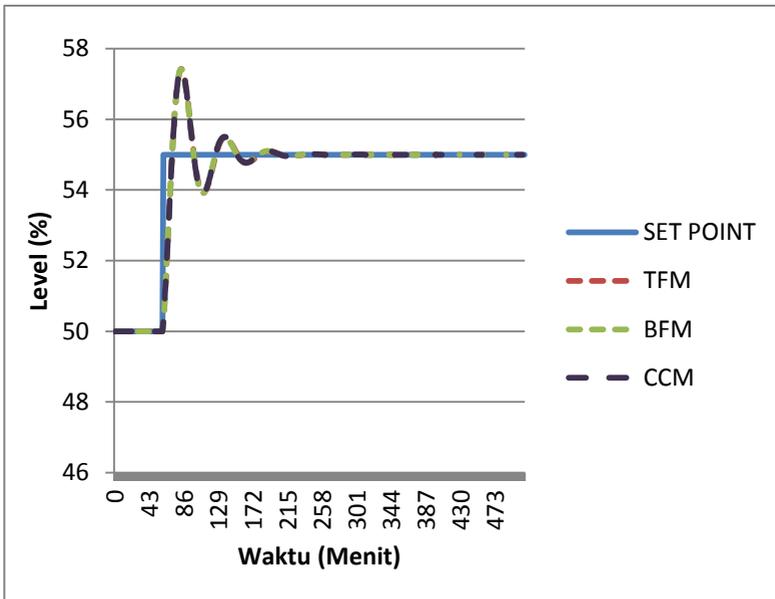
Dari nilai *max. overshoot* didapatkan bahwa nilai *max. overshoot* pada strategi kontrol TFM lebih kecil dibandingkan strategi kontrol BFM, dan CCM. Sehingga, strategi pengendali TFM memiliki kelebihan dalam mengurangi nilai *max. overshoot* pada uji penurunan *loop* pengendali LIC-100. Sedangkan untuk strategi kontrol CCM tidak begitu jauh perbedaann nilai *max. overshoot* nya dengan strategi kontrol BFM.

Berdasarkan nilai *settling time* nya, didapatkan bahwa strategi kontrol TFM pada uji penurunan *set point* pengendali LIC-100 memiliki waktu yang lebih lama untuk mencapai nilai *settling time* dibandingkan strategi kontrol BFM, dan CCM. Hal ini merupakan konsekuensi dari nilai *max. overshoot* yang lebih kecil pada strategi pengendali TFM. Sedangkan, untuk nilai

settling time antara strategi kontrol BFM, dan CCM memiliki nilai yang sama antara keduanya. Artinya penambahan *loop feed forward* pada pengendali PIC-100 CCM tidak berdampak pada uji penurunan *loop* pengendali LIC-100 CCM.

▪ Uji Kenaikan *Set Point* LIC-100

Pada uji kenaikan nilai *set point* LIC-100 juga terbagi dalam tiga uji kenaikan *set point*, yaitu uji kenaikan *set point* sebesar 30% dengan nilai *set point* level awal dari 50%, kemudian dinaikkan menjadi 65% , kemudian uji kenaikan *set point* sebesar 20% dengan nilai *set point* level awal sebesar 50% kemudian dinaikkan menjadi 60%. Lalu uji kenaikan *set point* sebesar 10%, dengan nilai awal *set point* level sebesar 50%, kemudian diturunkan menjadi 45%. Berikut uji penurunan nilai *set point* LIC-100 beserta analisa *close loop* pengendalinya.

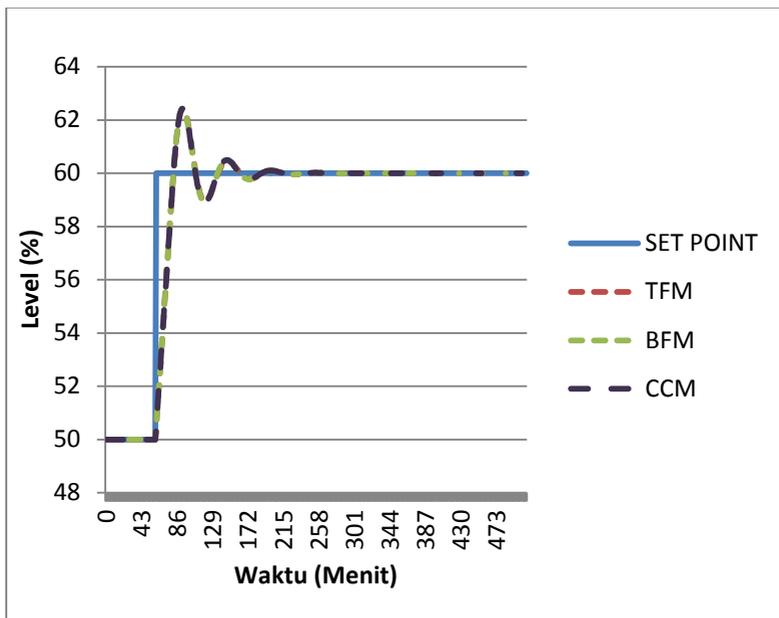


Gambar 4.13 Grafik perbandingan uji kenaikan nilai *set point* LIC-100 sebesar 10% pada BFM, TFM, dan CCM

Dari Gambar 4.13 didapatkan hasil analisa parameter *close loop* dari uji kenaikan nilai *set point* LIC-100 sebesar 10% seperti pada Tabel 4.22 di bawah.

Tabel 4.22 Analisa parameter *close loop* uji kenaikan *set point* LIC-100 sebesar 10% pada BFM, TFM, dan CCM

Strategi Kontrol	Analisa Performansi Pengendali LIC-100 (+10%)		
	IAE	Max. Overshoot (%)	Settling Time (Menit)
TFM	108,117	4,388	105
BFM	107,794	4,564	104
CCM	108,178	4,634	104

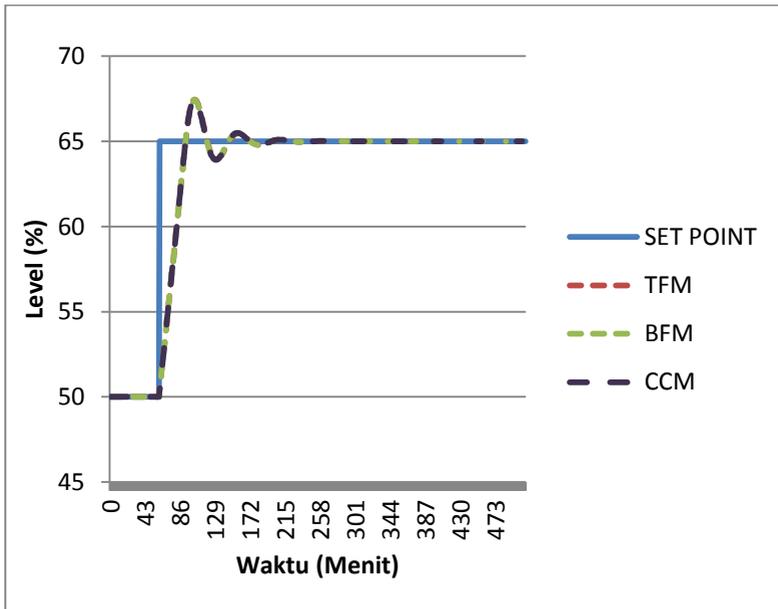


Gambar 4.14 Grafik perbandingan uji kenaikan nilai *set point* LIC-100 sebesar 20% pada BFM, TFM, dan CCM

Berdasarkan perbandingan grafik uji *close loop* kenaikan set point sebesar 20% seperti pada Gambar 4.14 diatas, maka di bawah ini ditunjukkan hasil analisa parameter *close loop* dari uji kenaikan nilai *set point* pada LIC-100 sebesar 20% seperti pada Tabel 4.23.

Tabel 4.23 Analisa parameter *close loop* uji kenaikan *set point* LIC-100 sebesar 20% pada BFM, TFM, dan CCM

Strategi Kontrol	Analisa Performansi Pengendali LIC-100 (+20%)		
	IAE	Max. Overshoot (%)	Settling Time (Menit)
TFM	188,749	4,77	87
BFM	188,549	4,942	87
CCM	189,033	5,006	87



Gambar 4.15 Grafik perbandingan uji kenaikan nilai *set point* LIC-100 sebesar 30% pada BFM, TFM, dan CCM

Pada Gambar 4.15 di atas ditunjukkan grafik perbandingan hasil uji *close loop* kenaikan *set point* LIC-100 sebesar 30%. Berikut ini ditunjukkan hasil analisa parameter *close loop* dari uji kenaikan nilai *set point* pada LIC-100 sebesar 10% seperti pada Tabel 4.24.

Tabel 4.24 Analisa parameter *close loop* uji kenaikan *set point* LIC-100 sebesar 30% pada BFM, TFM, dan CCM

Strategi Kontrol	Analisa Performansi Pengendali LIC-100 (+30%)		
	IAE	Max. Overshoot (%)	Settling Time (Menit)
TFM	326,488	3,114	97
BFM	325,649	3,229	96
CCM	326,227	3,277	96

Dari hasil uji *close loop* kenaikan nilai *set point* LIC-100 di atas, maka didapatkan nilai IAE antara ketiga strategi kontrol tidak begitu jauh seperti halnya pada uji penurunan nilai *set point* LIC-100 sebelumnya. Begitu pula didapatkan bahwa nilai IAE semakin bertambah seiring dengan semakin bertambahnya nilai uji kenaikan *set point*. Hal ini menunjukkan bahwa nilai karakteristik IAE antara uji kenaikan *set point* LIC-100 dengan uji penurunan *set point* LIC-100 pada ketiga strategi kontrol tidak jauh berbeda.

Kemudian dari perbandingan nilai *max. overshoot* antara ketiga strategi kontrol pada uji kenaikan *loop* pengendali LIC-100 didapatkan bahwasannya nilai *max.overshoot* terkecil terdapat pada strategi kontrol TFM, hal ini sama seperti pada uji *close loop* penurunan nilai *set point* LIC-100 sebelumnya.

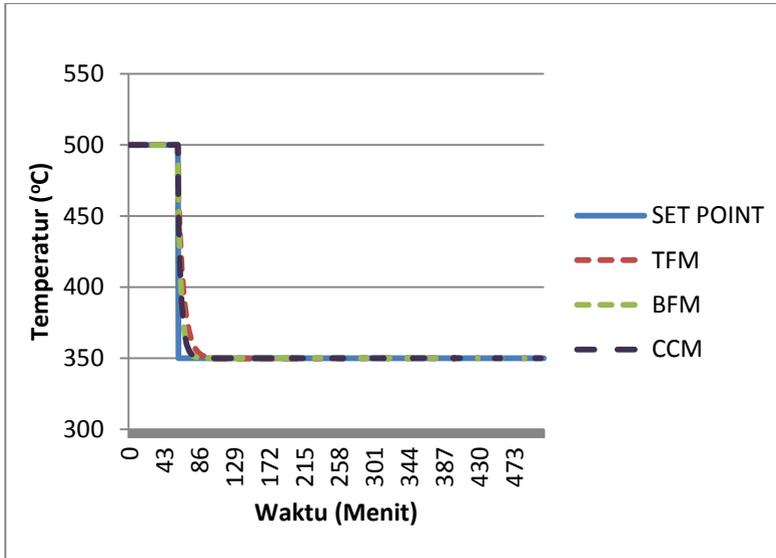
Berdasarkan nilai *settling time* antara BFM, TFM dan CCM nilai *settling time* TFM lebih besar dibandingkan keduanya, meskipun pada uji kenaikan sebesar 20% pengendali LIC-100 ketiganya memiliki nilai *settling time* yang sama.

4.2.2 Analisa *Close Loop* TIC-100

Berikut analisa *close loop* pengendali TIC-100 dan grafik perbandingan nilai uji *set point* sebesar $\pm 30\%$ pada strategi kontrol BFM, TFM, dan CCM.

▪ Uji Penurunan *Set Point* TIC-100

Pada uji penurunan nilai *set point* TIC-100, nilai uji terbagi dalam tiga macam yaitu uji penurunan nilai temperatur sebesar 30% dengan nilai *set point* temperatur awal *superheated steam* sebesar 500°C kemudian diturunkan menjadi 450°C. Lalu uji penurunan *set point* temperatur sebesar 20% dengan nilai awal temperatur *superheated steam* sebesar 500°C, kemudian diturunkan menjadi 400°C. Lalu uji penurunan nilai *set point* temperatur sebesar 10%, dengan nilai awal temperatur *superheated steam* sebesar 500°C, kemudian diturunkan menjadi 450°C. Berikut ditunjukkan uji penurunan nilai *set point* LIC-100 beserta analisa *close loop* pengendalinya.

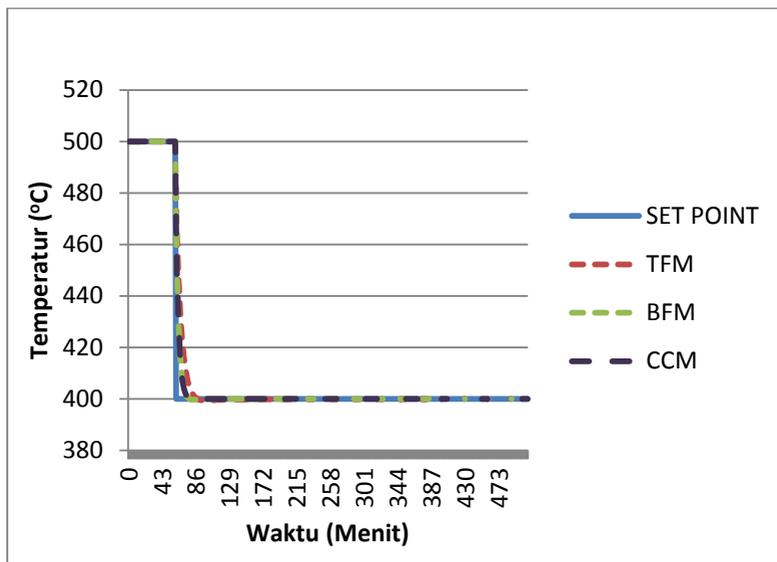


Gambar 4.16 Grafik perbandingan uji penurunan nilai *set point* TIC-100 sebesar 30% pada BFM, TFM, dan CCM

Dari hasil grafik perbandingan uji penurunan *set point* TIC-100 sebesar 30% seperti pada Gambar 4.16 di atas, maka pada Tabel 4.25 berikut ditunjukkan hasil analisa parameter *close loop* dari uji penurunan nilai *set point* pada TIC-100.

Tabel 4.25 Analisa parameter *close loop* uji penurunan *set point* TIC-100 sebesar 30% pada BFM, TFM, dan CCM

Strategi Kontrol	Analisa Performansi Pengendali TIC-100 (-30%)		
	IAE	Max. Overshoot (%)	Settling Time (Menit)
TFM	1043,615	0,185	58
BFM	633,903	0,011	42
CCM	633,998	0,009	42

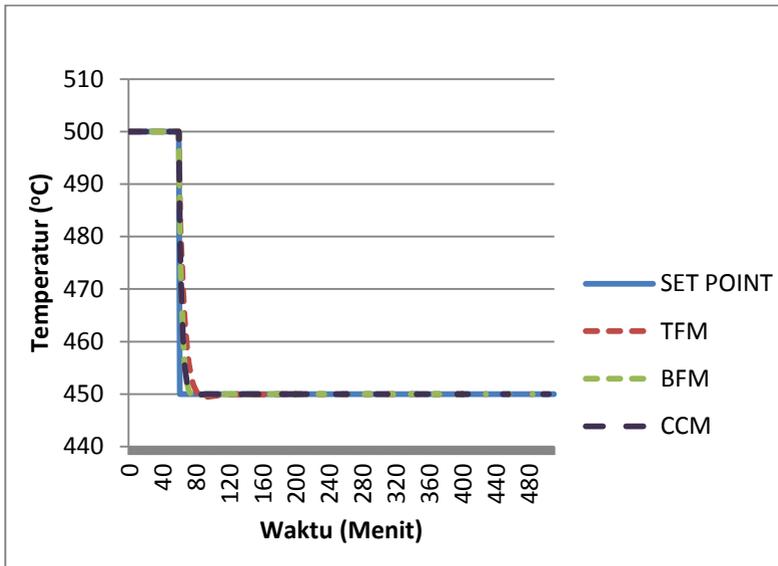


Gambar 4.17 Grafik perbandingan uji penurunan nilai *set point* TIC-100 sebesar 20% pada BFM, TFM, dan CCM

Berdasarkan Gambar 4.17 mengenai grafik hasil uji penurunan TIC-100 sebesar 20%, maka di bawah ini ditunjukkan hasil analisa parameter *close loop* dari uji penurunan nilai *set point* pada TIC-100 sebesar 20% seperti pada Tabel 4.26.

Tabel 4.26 Analisa parameter *close loop* uji penurunan *set point* TIC-100 sebesar 20% pada BFM, TFM, dan CCM

Strategi Kontrol	Analisa Performansi Pengendali TIC-100 (-20%)		
	IAE	Max. Overshoot (%)	Settling Time (Menit)
TFM	643,117	0,596	39
BFM	383,548	0,24	23
CCM	382,309	0,187	24



Gambar 4.18 Grafik perbandingan uji penurunan nilai *set point* TIC-100 sebesar 10% pada BFM, TFM, dan CCM

Dari hasil uji *close loop* penurunan nilai *set point* TIC-100 sebesar 10% seperti pada Gambar 4.18. Berikut merupakan hasil analisa parameter *close loop* dari uji penurunan nilai *set point* pada TIC-100 seperti pada Tabel 4.27.

Tabel 4.27 Analisa parameter *close loop* uji penurunan *set point* TIC-100 sebesar 10% pada BFM, TFM, dan CCM

Strategi Kontrol	Analisa Performansi Pengendali TIC-100 (-10%)		
	IAE	<i>Max. Overshoot</i> (%)	<i>Settling Time</i> (Menit)
TFM	307,551	0,009	39
BFM	181,761	0,006	23
CCM	181,064	0,002	24

Berdasarkan perbandingan uji penurunan TIC-100 pada ketiga strategi kontrol BFM, TFM, dan CCM, nilai IAE terbesar berada pada strategi kontrol TFM, sedangkan untuk nilai IAE BFM, dan CCM tidak begitu jauh berbeda, pada uji penurunan 10% dan 20% nilai IAE CCM lebih kecil dibandingkan BFM, namun pada uji penurunan sebesar 30% nilai IAE BFM justru lebih besar dibandingkan CCM. Perbedaan nilai IAE antara keduanya hanya terpaut sedikit. Didapatkan pula nilai IAE terkecil pada uji penurunan 10% sebesar 181,064.

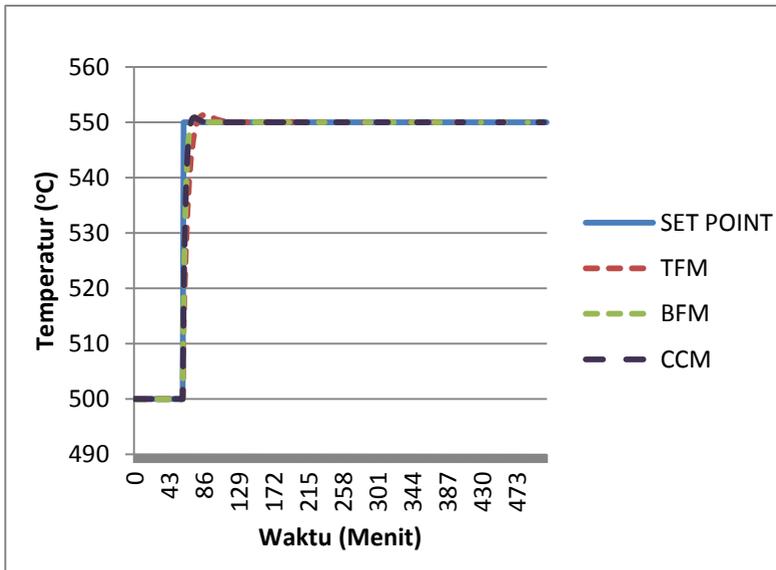
Dari perbandingan nilai *max. overshoot* pada uji *close loop* penurunan *set point loop* pengendali TIC-100 antara BFM, TFM, dan CCM didapatkan nilai terendah ada pada strategi kontrol CCM dengan nilai *max. overshoot* sebesar 0,002 % pada saat uji penurunan *set point* sebesar 10% , dan didapatkan nilai *max. overshoot* terbesar ada pada strategi kontrol TFM.

Berdasarkan hasil perhitungan nilai *settling time* pada strategi kontrol BFM, TFM dan CCM didapatkan strategi kontrol yang memiliki nilai *settling time* tercepat yaitu pada BFM, dan CCM. Perbedaan antara kedua nilai tersebut tidak begitu jauh, hanya pada uji penurunan TIC-100 sebesar 10% dan 20% nilai

settling time BFM lebih cepat 1 menit, kemudian setelah itu keduanya memiliki nilai *settling time* yang sama.

▪ **Uji Kenaikan *Set Point* TIC-100**

Uji kenaikan nilai *set point* TIC-100 terbagi dalam tiga macam yaitu uji kenaikan nilai temperatur sebesar 30% dengan nilai *set point* temperatur awal *superheated steam* sebesar 500 °C kemudian dinaikkan menjadi 650 °C, kemudian uji kenaikan *set point* temperatur sebesar 20% dengan nilai awal temperatur *superheated steam* sebesar 500 °C kemudian dinaikkan menjadi 600 °C. Lalu uji kenaikan nilai *set point* temperatur sebesar 10%, dengan nilai awal temperatur *superheated steam* sebesar 500°C, kemudian dinaikkan nilainya menjadi 550°C. Berikut ditunjukkan uji kenaikan nilai *set point* TIC-100 sebesar 10%, 20%, dan 30% beserta analisa performansi *close loop* pengendalinya.

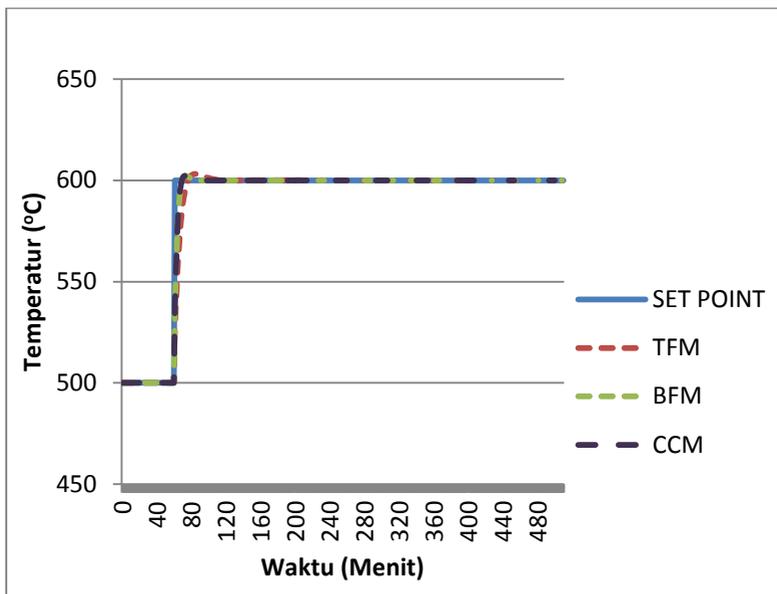


Gambar 4.19 Grafik perbandingan uji kenaikan nilai *set point* TIC-100 sebesar 10% pada BFM, TFM, dan CCM

Berdasarkan perbandingan grafik hasil uji kenaikan nilai set point sebesar 10% seperti pada Gambar 4.19, berikut ditunjukkan hasil analisa parameter *close loop* dari uji kenaikan nilai *set point* pada TIC-100 sebesar 10% seperti pada Tabel 4.28.

Tabel 4.28 Analisa parameter *close loop* uji kenaikan *set point* TIC-100 sebesar 10% pada BFM, TFM, dan CCM

Strategi Kontrol	Analisa Performansi Pengendali TIC-100 (+10%)		
	IAE	Max. Overshoot (%)	Settling Time (Menit)
TFM	294,552	2,572	31
BFM	169,014	1,748	14
CCM	168,244	1,714	14

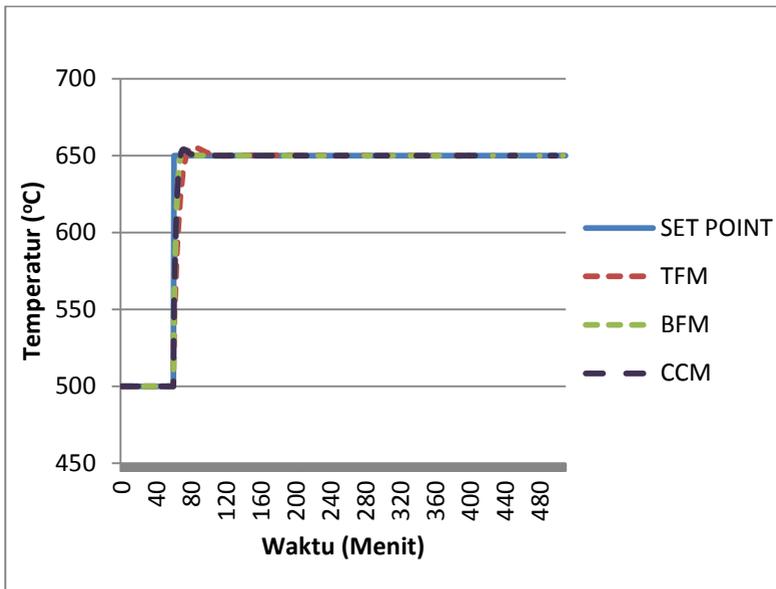


Gambar 4.20 Grafik perbandingan uji kenaikan nilai *set point* TIC-100 sebesar 20% pada BFM, TFM, dan CCM

Dari Gambar 4.20 di atas mengenai grafik hasil uji kenaikan set point sebesar 20% pada TIC-100, di bawah ini ditunjukkan hasil analisa parameter *close loop* dari uji kenaikan nilai *set point* pada TIC-100 sebesar 20% seperti pada Tabel 4.29.

Tabel 4.29 Analisa parameter *close loop* uji kenaikan *set point* TIC-100 sebesar 20% pada BFM, TFM, dan CCM

Strategi Kontrol	Analisa Performansi Pengendali TIC-100 (+20%)		
	IAE	Max. Overshoot (%)	Settling Time (Menit)
TFM	577,918	3,094	26
BFM	327,923	2,311	13
CCM	326,358	2,297	13



Gambar 4.21 Grafik perbandingan uji kenaikan nilai *set point* TIC-100 sebesar 30% pada BFM, TFM, dan CCM

Pada Gambar 4.21 di atas ditunjukkan nilai perbandingan uji kenaikan pengendali TIC-100 sebesar 30%, dari hasil tersebut maka pada Tabel 4.30 di bawah ini ditunjukkan hasil analisa parameter *close loop* dari uji kenaikan nilai *set point* pada TIC-100 sebesar 30%.

Tabel 4.30 Analisa parameter *close loop* uji kenaikan *set point* TIC-100 sebesar 30% pada BFM, TFM, dan CCM

Strategi Kontrol	Analisa Performansi Pengendali LIC-100 (+30%)		
	IAE	<i>Max. Overshoot</i> (%)	<i>Settling Time</i> (Menit)
TFM	326,488	3,114	97
BFM	325,649	3,229	96
CCM	326,227	3,277	96

Dari hasil analisa uji *close loop* kenaikan *set point* temperatur pada pengendali TIC-100 terhadap ketiga strategi kontrol BFM, TFM, dan CCM di atas, didapatkan nilai IAE terkecil pada strategi kontrol CCM, kemudian nilai IAE terbesar terdapat pada strategi kontrol TFM. Adapun nilai IAE CCM, dan BFM tidak teralau jauh terpautnya, meski nilai IAE CCM lebih kecil dari nilai IAE BFM. Nilai IAE terkecil terjadi pada saat uji *close loop* kenaikan nilai *set point* TIC-100 sebesar 10% yaitu dengan nilai IAE sebesar 168,244. Adapun jika dibandingkan antara nilai hasil uji kenaikan dan nilai hasil uji penurunan *loop* pengendali TIC-100, didapatkan hasil uji kenaikan pengendali TIC-100 memiliki nilai IAE yang lebih kecil dibandingkan uji penurunan pengendali TIC-100 yang telah dilakukan sebelumnya. Kenaikan IAE juga semakin besar seiring dengan semakin besarnya nilai kenaikan uji *set point* TIC-100.

Berdasarkan nilai *max. overshoot* nya, nilai terendah ada pada strategi kontrol CCM. Dimana nilai *max. overshoot* terendah terjadi pada saat uji kenaikan *set point* sebesar 10%, yaitu dengan nilai *max. overshoot* sebesar 1,714. Jika dibandingkan antara uji kenaikan dan penurunan nilai *set point* yang dilakukan

sebelumnya, nilai *max. overshoot* pada uji penurunan *set point* lebih rendah dari pada uji kenaikan *set point*. Artinya pada uji kenaikan *set point* pengendali TIC-100 lebih besar nilai *max. overshoot* yang dihasilkan dibandingkan dengan melakukan uji penurunan nilai *set point* TIC-100. Dari hasil analisa *close loop* di atas didapatkan pula bahwa semakin besar nilai uji, maka semakin besar nilai *max. overshoot* nya.

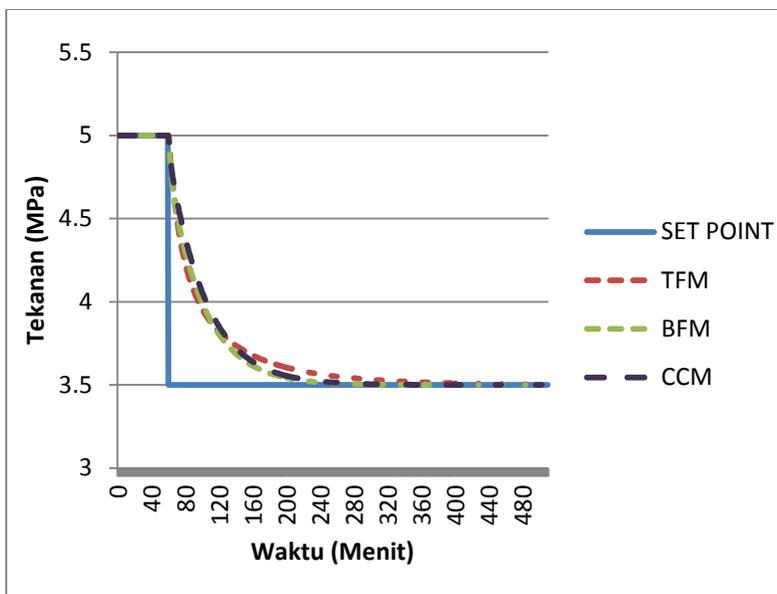
Kemudian dengan membandingkan nilai *settling time* dari strategi pengendali BFM, TFM, dan CCM, nilai *settling time* tercepat terdapat pada pengendali CCM, dan BFM, keduanya memiliki nilai *settling time* yang sama. Dari hasil analisa tersebut didapatkan pula bahwa semakin besar nilai uji kenaikan, maka nilai *settling time* semakin kecil, hal ini berkebalikan pada saat uji penurunan *set point* pengendali TIC-100. Nilai *settling time* terendah terjadi pada saat uji kenaikan *set point* sebesar 30% dengan nilai *settling time* sebesar 12 menit.

4.2.3 Analisa Close Loop PIC-100

Berikut hasil analisa *close loop* pengendali PIC-100 beserta nilai uji kenaikan dan penurunan nilai *set point* sebesar 30% pada strategi kontrol BFM, TFM, dan CCM.

Uji Penurunan Set Point PIC-100

Pada uji penurunan nilai *set point* PIC-100 terdapat tiga macam nilai uji yaitu uji penurunan tekanan sebesar 30% dengan nilai *set point* tekanan awal *output steam drum* sebesar 5 MPa, kemudian diturunkan menjadi 3,5 MPa. Lalu uji penurunan *set point* tekanan sebesar 20% dengan nilai awal tekanan *output steam drum* sebesar 5 MPa, kemudian tekanan diturunkan menjadi 4 MPa. Lalu uji penurunan *set point* tekanan sebesar 10%, dengan nilai awal tekanan sebesar 5MPa, kemudian tekanan diturunkan menjadi 4,5 MPa. Berikut ditunjukkan uji penurunan nilai *set point* PIC-100 beserta analisa *close loop* pengendalinya.

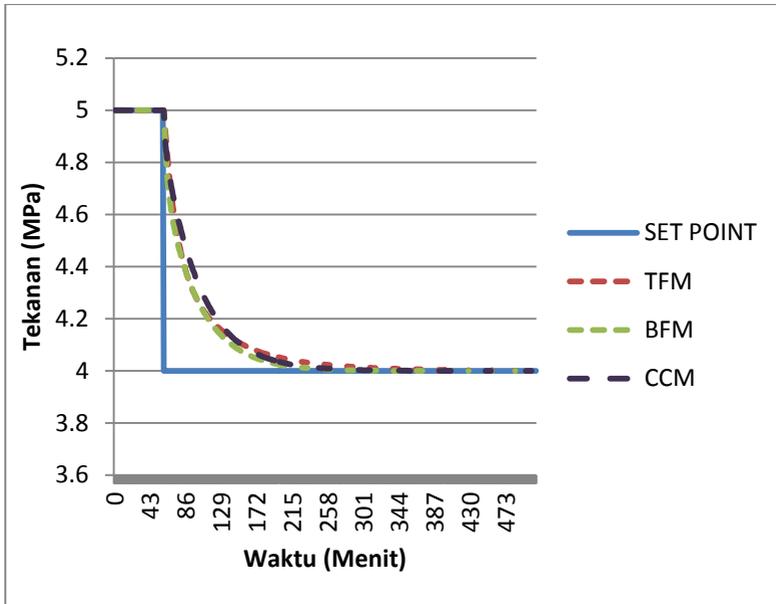


Gambar 4.22 Grafik perbandingan uji penurunan nilai *set point* PIC-100 sebesar 30% pada BFM, TFM, dan CCM

Berdasarkan grafik hasil uji penurunan tekanan sebesar 30% seperti pada Gambar 4.22, maka berikut ditunjukkan hasil analisa parameter *close loop* dari uji penurunan nilai *set point* PIC-100 sebesar 10% seperti pada Tabel 4.31 dibawah

Tabel 4.31 Analisa parameter *close loop* uji penurunan *set point* PIC-100 sebesar 30% pada BFM, TFM, dan CCM

Strategi Kontrol	Analisa Performansi Pengendali PIC-100 (-30%)		
	IAE	<i>Max. Overshoot</i> (%)	<i>Settling Time</i> (Menit)
TFM	64,633	0	414
BFM	54,972	0	228
CCM	61,645	0	243

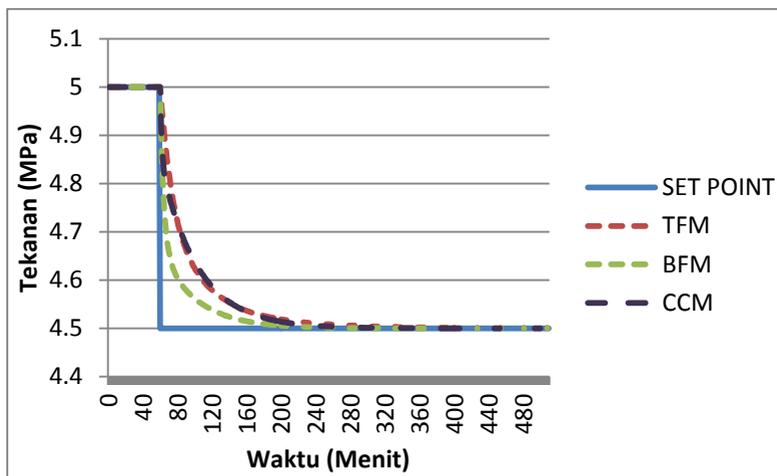


Gambar 4.23 Grafik perbandingan uji penurunan nilai *set point* PIC-100 sebesar 20% pada BFM, TFM, dan CCM

Dari Gambar 4.23 mengenai grafik hasil uji close loop penurunan tekanan pada pengendali PIC-100, berikut ditunjukkan hasil analisa parameter *close loop* dari uji penurunan nilai *set point* pada PIC-100 sebesar 20% seperti pada Tabel 4.32.

Tabel 4.32 Analisa parameter *close loop* uji penurunan *set point* PIC-100 sebesar 20% pada BFM, TFM, dan CCM

Strategi Kontrol	Analisa Performansi Pengendali PIC-100 (-20%)		
	IAE	Max. Overshoot (%)	Settling Time (Menit)
TFM	37,874	0	323
BFM	31,668	0	207
CCM	38,610	0	224



Gambar 4.24 Grafik perbandingan uji penurunan nilai *set point* PIC-100 sebesar 10% pada BFM, TFM, dan CCM

Seperti pada Gambar 4.24 yang menunjukkan grafik hasil uji penurunan tekanan sebesar 10%, maka pada Tabel 4.33 dibawah ditunjukkan hasil analisa parameter *close loop* dari uji penurunan nilai *set point* pada PIC-100 sebesar 10%.

Tabel 4.33 Analisa parameter *close loop* uji penurunan *set point* PIC-100 sebesar 10% pada BFM, TFM, dan CCM

Strategi Kontrol	Analisa Performansi Pengendali PIC-100 (-10%)		
	IAE	<i>Max. Overshoot</i> (%)	<i>Settling Time</i> (Menit)
TFM	16,889	0	233
BFM	8,416	0	145
CCM	15,598	0	185

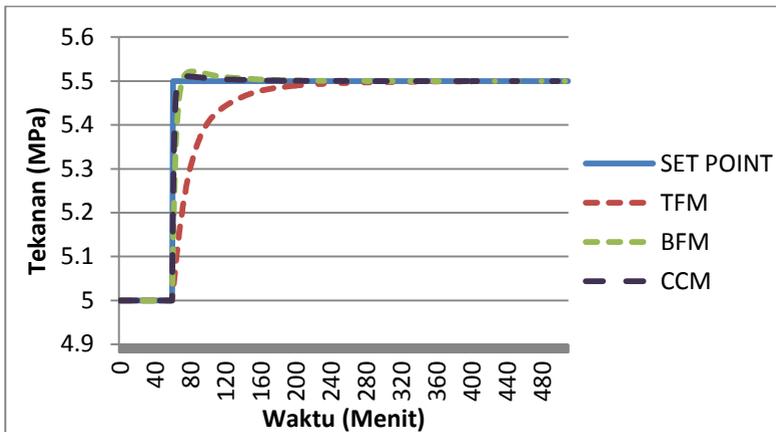
Dari hasil perbandingan uji penurunan nilai *set point* tekanan pengendali PIC-100 pada tiga strategi kontrol BFM, TFM, dan CCM, didapatkan nilai IAE terendah untuk pengendali BFM, dan nilai IAE terbesar pada strategi kontrol TFM. Adapun nilai IAE

terendah terjadi saat uji penurunan tekanan sebesar 10% dengan nilai IAE sebesar 8,416. Kemudian dari hasil perhitungan nilai *max. overshoot* didapatkan ketiga pengendali tidak memiliki *max. overshoot*.

Dari nilai *settling time*, pengendali BFM memiliki nilai *settling time* terendah, dan nilai *settling time* tertinggi pada pengendali TFM. Nilai *settling time* terendah yang dapat dicapai dari uji penurunan tekanan terjadi pada saat uji penurunan tekanan sebesar 10% dengan nilai *settling time* sebesar 145 menit.

Uji Kenaikan Set Point PIC-100

Pada uji kenaikan nilai *set point* PIC-100 terdapat tiga nilai uji yaitu uji kenaikan tekanan sebesar 30% dengan nilai awal *set point* tekanan *output steam drum* sebesar 5 MPa, kemudian dinaikkan menjadi 6,5 MPa. Lalu uji kenaikan *set point* tekanan sebesar 20% dengan nilai awal tekanan *output steam drum* sebesar 5 MPa, kemudian tekanan dinaikkan menjadi 6 MPa. Lalu uji kenaikan *set point* tekanan sebesar 10%, dengan nilai awal tekanan sebesar 5MPa, kemudian tekanan dinaikkan menjadi 5,5 MPa. Berikut ditunjukkan uji kenaikan nilai *set point* PIC-100 beserta analisa *close loop* pengendalinya.

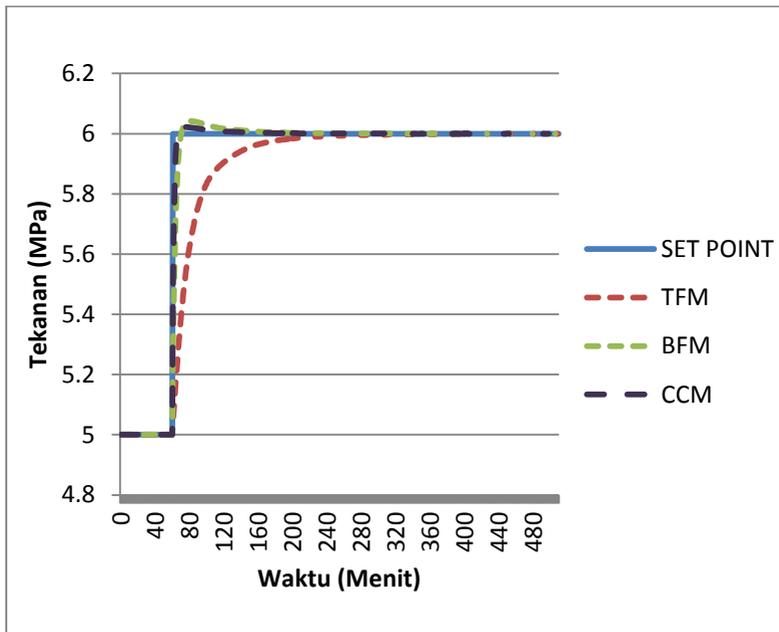


Gambar 4.25 Grafik perbandingan uji kenaikan nilai *set point* PIC-100 sebesar 10% pada BFM, TFM, dan CCM

Berdasarkan Gambar 4.25 yang menunjukkan hasil uji kenaikan nilai set point, maka berikut ini ditunjukkan hasil analisa parameter *close loop* uji kenaikan nilai *set point loop* pengendali PIC-100 sebesar 10% seperti pada Tabel 4.34.

Tabel 4.34 Analisa parameter *close loop* uji kenaikan *set point* PIC-100 sebesar 10% pada BFM, TFM, dan CCM

Strategi Kontrol	Analisa Performansi Pengendali PIC-100 (+10%)		
	IAE	Max. Overshoot (%)	Settling Time (Menit)
TFM	35,437	0	234
BFM	8,505	3,738	134
CCM	4,834	1,737	97

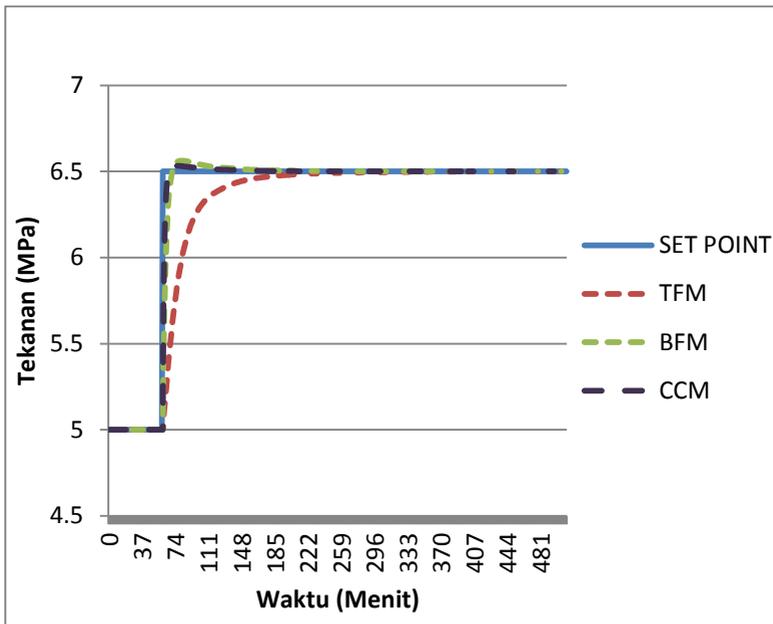


Gambar 4.26 Grafik perbandingan uji kenaikan nilai *set point* PIC-100 sebesar 20% pada BFM, TFM, dan CCM

Dari grafik uji kenaikan tekanan sebesar 20% seperti pada Gambar 4.25 di atas, didapatkan hasil analisa parameter *close loop* dari uji kenaikan nilai *set point* pada PIC-100 sebesar 20% seperti pada Tabel 4.35 berikut.

Tabel 4.35 Analisa parameter *close loop* uji kenaikan *set point* PIC-100 sebesar 20% pada BFM, TFM, dan CCM

Strategi Kontrol	Analisa Performansi Pengendali PIC-100 (+20%)		
	IAE	<i>Max. Overshoot</i> (%)	<i>Settling Time</i> (Menit)
TFM	35,437	0	234
BFM	8,505	3,738	134
CCM	4,834	1,737	97



Gambar 4.27 Grafik perbandingan uji kenaikan nilai *set point* PIC-100 sebesar 30% pada BFM, TFM, dan CCM

Berdasarkan Gambar 4.26 di atas yang menunjukkan hasil uji kenaikan *set point* tekanan, maka dari grafik tersebut di bawah ini ditunjukkan hasil analisa parameter *close loop* dari uji kenaikan nilai *set point* pada PIC-100 sebesar 30% seperti pada Tabel 4.36.

Tabel 4.36 Analisa parameter *close loop* uji kenaikan *set point* PIC-100 sebesar 30% pada BFM, TFM, dan CCM

Strategi Kontrol	Analisa Performansi Pengendali PIC-100 (+30%)		
	IAE	<i>Max. Overshoot</i> (%)	<i>Settling Time</i> (Menit)
TFM	35,437	0	234
BFM	8,505	3,738	134
CCM	4,834	1,737	97

Berdasarkan hasil analisa uji kenaikan *set point* tekanan PIC-100 untuk strategi kontrol BFM, TFM, dan CCM, maka didapatkan nilai IAE terkecil pada strategi kontrol CCM, dimana nilai terkecil didapatkan pada saat uji kenaikan tekanan sebesar 10% dengan nilai 1,659 nilai ini lebih kecil bila dibandingkan dengan uji penurunan tekanan. Artinya *error* yang dihasilkan dari uji kenaikan tekanan lebih kecil dibandingkan dengan nilai uji penurunan tekanan.

Kemudian dari nilai *max. overshoot*, strategi kontrol TFM tetap memiliki nilai terkecil, dan mampu mempertahankan agar nilai *max. overshoot* tetap nol dibandingkan strategi kontrol BFM, dan CCM. Untuk nilai *max. overshoot* uji penurunan tekanan lebih baik dibandingkan uji kenaikan tekanan.

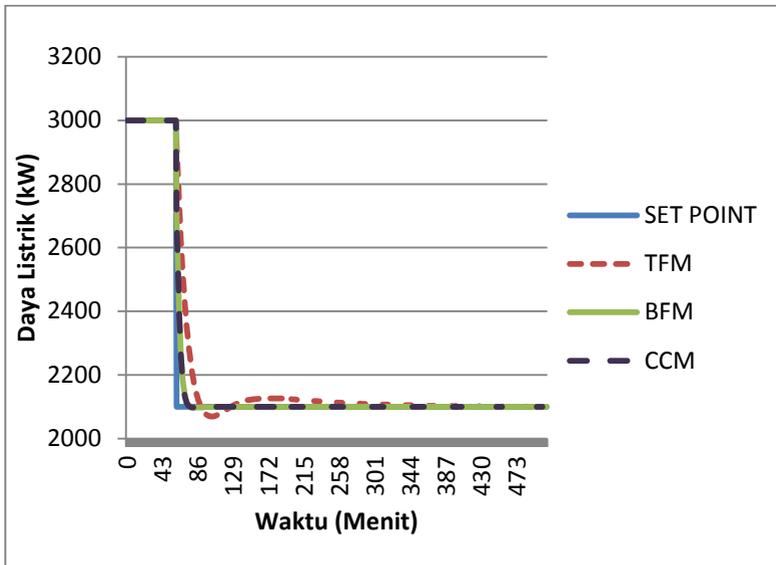
Lalu berdasarkan nilai *settling time* pada uji kenaikan tekanan, strategi kontrol CCM memiliki nilai yang paling rendah, dan nilai terendah terjadi pada saat uji kenaikan tekanan sebesar 10% dengan nilai *settling time* yang dicapai sebesar 50 menit, nilai ini lebih rendah dibandingkan nilai *settling time* strategi kontrol BFM pada saat uji penurunan tekanan.

4.2.4 Analisa *Close Loop* IC-100

Dan berikut dijelaskan hasil analisa *close loop* pengendali IC-100 beserta nilai uji kenaikan dan penurunan nilai *set point* sebesar 30% pada strategi kontrol BFM, TFM, dan CCM.

▪ Uji Penurunan *Set Point* IC-100

Pada uji penurunan nilai *set point* IC-100 ada tiga macam nilai uji yaitu uji penurunan tekanan sebesar 30% dengan nilai *set point* daya listrik awal sebesar 3000 kW, lalu diturunkan menjadi 2100 kW. Kemudian uji penurunan *set point* daya sebesar 20% dengan nilai awal daya listrik sebesar 3000 kW, setelah itu daya listrik diturunkan menjadi 2400 kW. Lalu uji penurunan *set point* daya listrik sebesar 10% dengan nilai awal daya listrik sebesar 3000 kW, kemudian daya listrik diturunkan menjadi 2700 kW. Berikut ditunjukkan uji penurunan nilai *set point* IC-100 beserta analisa *close loop* pengendalinya.

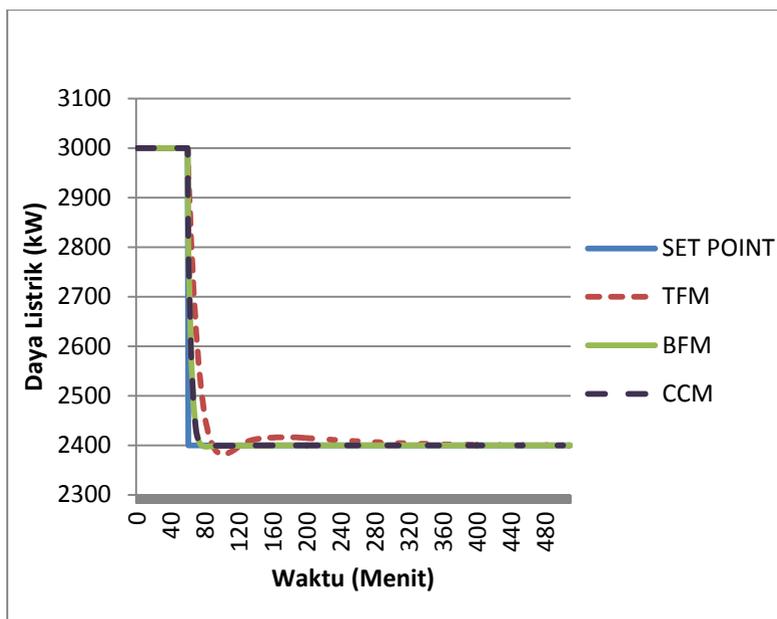


Gambar 4.28 Grafik perbandingan uji penurunan nilai *set point* IC-100 sebesar 30% pada BFM, TFM, dan CCM

Berdasarkan Gambar 4.27 di atas mengenai hasil uji penurunan daya listrik sebesar 30%, maka dari grafik tersebut didapatkan hasil analisa parameter *close loop* dari uji penurunan nilai *set point* pada IC-100 sebesar 10% seperti pada Tabel 4.37.

Tabel 4.37 Analisa parameter *close loop* uji penurunan *set point* IC-100 sebesar 30% pada BFM, TFM, dan CCM

Strategi Kontrol	Analisa Performansi Pengendali IC-100 (-30%)		
	IAE	Max. Overshoot (%)	Settling Time (Menit)
TFM	13.308,710	3,426	43
BFM	3574,230	0,301	24
CCM	3496,210	0,263	21

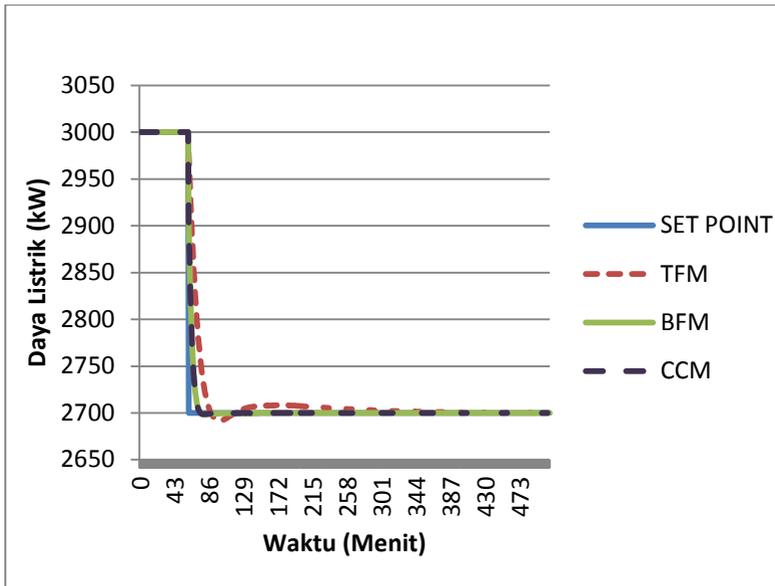


Gambar 4.29 Grafik perbandingan uji penurunan nilai *set point* IC-100 sebesar 20% pada BFM, TFM, dan CCM

Dari hasil uji penurunan nilai *set point* daya listrik sebesar 20% seperti pada Gambar 4.28, kemudian dari grafik didapatkan hasil analisa parameter *close loop* dari uji penurunan nilai *set point* pengendali IC-100 sebesar 20% seperti pada Tabel 4.38.

Tabel 4.38 Analisa parameter *close loop* uji penurunan *set point* IC-100 sebesar 20% pada BFM, TFM, dan CCM

Strategi Kontrol	Analisa Performansi Pengendali IC-100 (-20%)		
	IAE	Max. Overshoot (%)	Settling Time (Menit)
TFM	8621,170	2,97	41
BFM	2391.650	0,405	22
CCM	2335,000	0,375	21



Gambar 4.30 Grafik perbandingan uji penurunan nilai *set point* IC-100 sebesar 10% pada BFM, TFM, dan CCM

Pada Gambar 4.29 di atas yang merupakan hasil uji penurunan nilai *set point* daya listrik sebesar 10 %, maka di bawah ini ditunjukkan hasil analisa parameter *close loop* dari uji penurunan nilai *set point* pada IC-100 sebesar 10% seperti pada Tabel 4.39.

Tabel 4.39 Analisa parameter *close loop* uji penurunan *set point* IC-100 sebesar 10% pada BFM, TFM, dan CCM

Strategi Kontrol	Analisa Performansi Pengendali IC-100 (-10%)		
	IAE	<i>Max. Overshoot</i> (%)	<i>Settling Time</i> (Menit)
TFM	4203,890	2,7	40
BFM	1204,460	0,487	21
CCM	1173,770	0,473	21

Berdasarkan hasil analisa performansi pengendali IC-100 pada saat uji penurunan daya listrik didapatkan bahwa nilai IAE terendah pada strategi pengendali CCM, dengan nilai IAE terendah pada saat uji penurunan daya listrik sebesar 10% dengan nilai IAE sebesar 1173,770 terpaut sedikit dengan nilai IAE pada strategi kontrol BFM. Kemudian nilai IAE tertinggi ada pada strategi kontrol TFM.

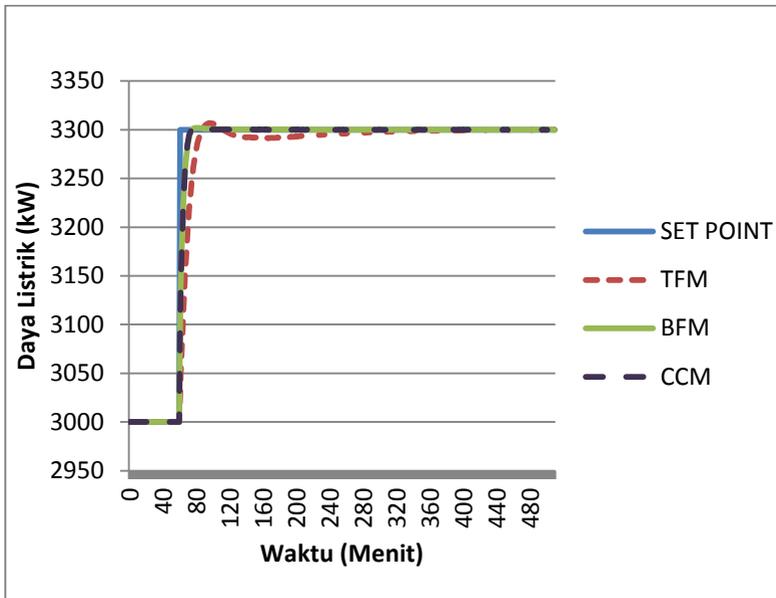
Sedangkan untuk nilai *max. overshoot*, strategi kontrol CCM pula yang memiliki nilai *max. overshoot* terendah, yaitu pada saat uji penurunan daya listrik sebesar 30% dengan nilai *max. overshoot* sebesar 0,263 %. Nilai *max. overshoot* hasil analisa *close loop* yang didapat menunjukkan *trend* bahwa semakin besar nilai uji penurunan tekanan, maka semakin kecil nilai *max. overshootnya*.

Begitu pula untuk nilai *settling time*, strategi pengendali CCM yang memiliki nilai *settling time* terendah. Nilai *settling time* yang diperoleh strategi kontrol CCM stagnan pada nilai 21 menit untuk uji penurunan daya listrik sebesar 30%, 20%, dan 10%. Nilai tersebut merupakan nilai *settling time* terendah dibandingkan pada strategi kontrol BFM, TFM dan CCM, meski

nilai *settling time* pada strategi kontrol BFM pada uji penurunan 10% memiliki nilai *settling time* yang sama, dan pada penurunan uji daya listrik yang semakin besar tidak begitu jauh berbeda dengan strategi kontrol CCM.

▪ **Uji Kenaikan *Set Point* IC-100**

Pada uji kenaikan nilai *set point* IC-100 terdapat tiga nilai uji yaitu uji kenaikan daya listrik sebesar 30% dengan nilai awal *set point* daya listrik sebesar 3000 kW, setelah itu dinaikkan menjadi 3900 kW. Lalu uji kenaikan *set point* daya listrik sebesar 20% dengan nilai awal daya listrik sebesar 3000 kW, kemudian daya listrik dinaikkan menjadi 3600 kW. Lalu uji kenaikan *set point* daya listrik sebesar 10%, dengan nilai awal daya listrik sebesar 3000 kW, setelah itu daya listrik dinaikkan menjadi 3300 kW. Berikut ditunjukkan uji kenaikan nilai *set point* IC-100 beserta analisa *close loop* pengendalinya.

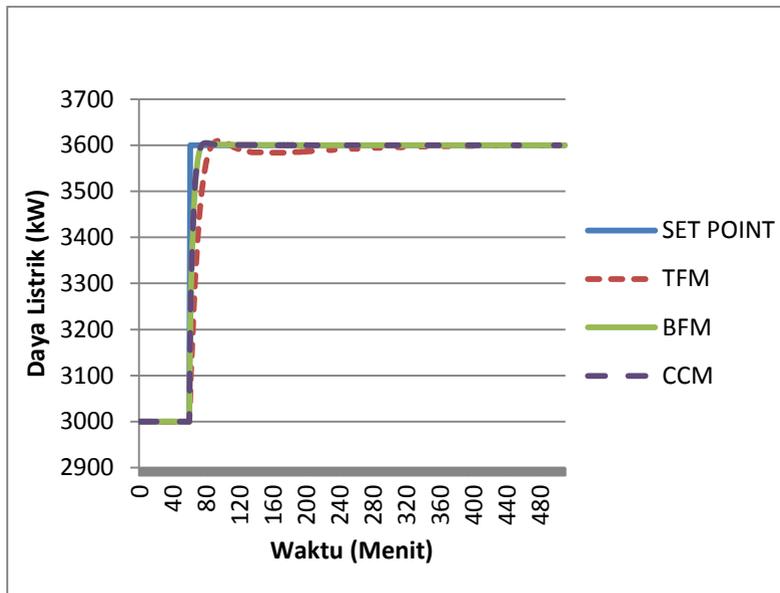


Gambar 4.31 Grafik perbandingan uji kenaikan nilai *set point* IC-100 sebesar 10% pada BFM, TFM, dan CCM

Berdasarkan Gambar 4.30 yang menunjukkan grafik uji kenaikan *set point* daya listrik sebesar 10%, maka dari grafik didapatkan hasil analisa parameter *close loop* dari uji kenaikan nilai *set point* pada IC-100 sebesar 10% seperti pada Tabel 4.40 di bawah

Tabel 4.40 Analisa parameter *close loop* uji kenaikan *set point* IC-100 sebesar 10% pada BFM, TFM, dan CCM

Strategi Kontrol	Analisa Performansi Pengendali IC-100 (+10%)		
	IAE	Max. Overshoot (%)	Settling Time (Menit)
TFM	4070,830	2,283	37
BFM	1213,050	0,67	21
CCM	1178,620	0,67	19

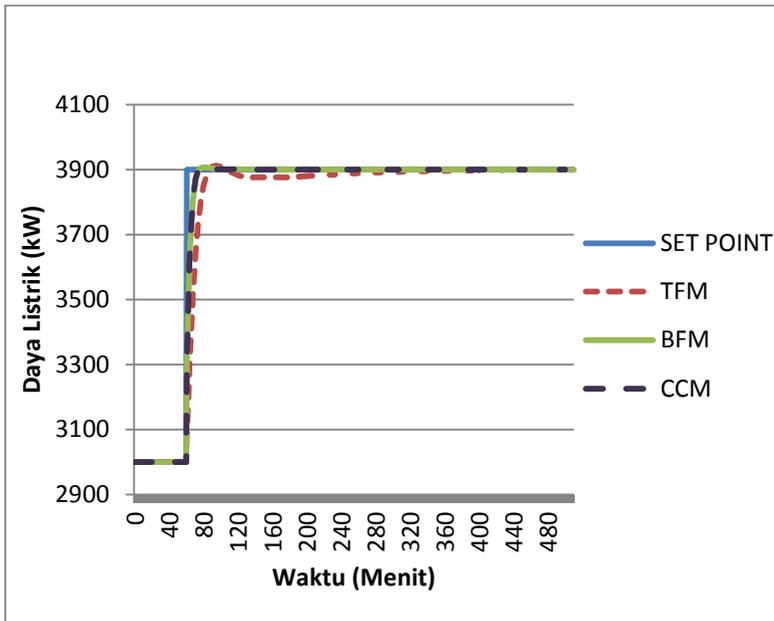


Gambar 4.32 Grafik perbandingan uji kenaikan nilai *set point* IC-100 sebesar 20% pada BFM, TFM, dan CCM

Pada Tabel 4.41 berikut ditunjukkan hasil analisa parameter *close loop* dari uji kenaikan nilai *set point* pada IC-100 sebesar 20% yang didapatkan dari grafik uji kenaikan *set point* daya listrik seperti pada Gambar 4.31 di atas.

Tabel 4.41 Analisa parameter *close loop* uji penurunan *set point* IC-100 sebesar 20% pada BFM, TFM, dan CCM

Strategi Kontrol	Analisa Performansi Pengendali IC-100 (+20%)		
	IAE	Max. Overshoot (%)	Settling Time (Menit)
TFM	7925,970	1,625	37
BFM	2430,070	0,767	20
CCM	2352,740	0,735	19



Gambar 4.33 Grafik perbandingan uji kenaikan nilai *set point* IC-100 sebesar 30% pada BFM, TFM, dan CCM

Dari hasil uji kenaikan nilai set point daya listrik sebesar 30% seperti ditunjukkan pada Gambar 4.32, kemudian dari grafik didapatkan hasil analisa parameter *close loop* dari uji kenaikan nilai *set point* pada IC-100 sebesar 30% seperti pada Tabel 4.42.

Tabel 4.42 Analisa parameter *close loop* uji kenaikan *set point* IC-100 sebesar 30% pada BFM, TFM, dan CCM

Strategi Kontrol	Analisa Performansi Pengendali IC-100 (+30%)		
	IAE	<i>Max. Overshoot</i> (%)	<i>Settling Time</i> (Menit)
TFM	11.701,770	1,298	34
BFM	3653,150	0,839	22
CCM	3530,380	0,813	19

Dari hasil uji kenaikan daya listrik yang telah dilakukan sebetulnya dari *loop* pengendali IC-100 pada strategi kontrol BFM, TFM, dan CCM. Maka didapatkan nilai IAE terendah tetap pada strategi kontrol CCM, dengan nilai IAE terendah sebesar 1178,620, terpaut sedikit dengan nilai IAE pada BFM. Nilai ini tidak lebih rendah dibanding dengan nilai uji penurunan daya listrik, meskipun kedua nilai tersebut tidak jauh perbedaannya. Nilai IAE terendah tetap pada strategi kontrol TFM baik untuk uji kenaikan maupun uji penurunan daya listrik.

Berdasarkan nilai *max. overshoot* strategi kontrol CCM juga yang memiliki nilai terendah, meski pada saat uji kenaikan daya listrik sebesar 10% keduanya memiliki nilai *max. overshoot*, yang sama, namun pada nilai uji kenaikan daya listrik yang lebih besar strategi kontrol CCM memiliki nilai *max. overshoot* yang lebih rendah. Untuk perbandingan uji kenaikan dan uji penurunan daya listrik, pada uji penurunan daya listrik memiliki nilai *max. overshoot* yang lebih rendah dari uji kenaikan daya listrik.

Kemudian dari hasil yang diperoleh dari uji kenaikan daya listrik, nilai *settling time* terendah ada pada strategi kontrol CCM, dengan nilai *settling time* tetap pada 19 menit untuk uji kenaikan

daya listrik sebesar 10% , 20% , dan 30%. Nilai ini merupakan nilai terendah bila di dibandingkan dengan nilai *settling time* yang didapatkan pada strategi kontrol BFM, dan TFM, begitu pula jika dibandingkan antara uji kenaikan dan uji penurunan nilai *set point*, nilai tersebut lebih rendah dibandingkan hasil yang diperoleh pada uji penurunan daya listrik.

4.3 Pembahasan

Setelah dilakukan uji *close loop* dan uji *open loop* pada pengendali boiler-turbin, didapatkan nilai parameter λ dari *tuning* IMC-PID pada strategi kontrol CCM untuk *loop* pengendali LIC-100 sebesar 2 menit, kemudian untuk *loop* pengendali TIC-100 sebesar 3,5 menit, lalu untuk pengendali PIC-100 sebesar 10 menit, dan untuk pengendali IC-100 sebesar 3 menit.

Dari hasil *tuning* pada setiap *loop* pengendali tersebut didapatkan hasil perhitungan nilai performansi pengendali terbaik untuk strategi kontrol CCM terletak pada pengendali IC-100. Dimana nilai IAE terbaik untuk uji penurunan *set point* daya listrik sebesar 1173,77, lebih rendah nilainya dibandingkan nilai IAE BFM sebesar 1204,46 dan nilai IAE TFM sebesar 4203,89. Untuk uji kenaikan *set point* daya listrik didapatkan nilai IAE CCM terendah sebesar 1178,62, lebih rendah dibandingkan dengan nilai IAE BFM sebesar 1213,05, dan nilai IAE TFM sebesar 4070,83.

Lalu untuk nilai *max. overshoot* terbaik pada uji penurunan *set point* daya listrik CCM didapatkan nilai sebesar 0,263%, nilai ini lebih rendah dibandingkan nilai *max. overshoot* BFM yang memiliki nilai *max. overshoot* sebesar 0,301% dan nilai *max. overshoot* TFM sebesar 2,7%. Sedangkan nilai *max. overshoot* CCM terbaik pada uji kenaikan *set point* daya listrik didapatkan sebesar 0,67% sama seperti nilai *max. overshoot* pada BFM, dan nilai *max. overshoot* terendah pada strategi kontrol TFM dengan nilai sebesar 2,283%.

Kemudian berdasarkan nilai *settling time*, dari uji penurunan *set point* daya listrik didapatkan nilai *settling time* CCM tercepat sebesar 21 menit, sama seperti nilai *settling time* BFM, dan lebih

cepat dibandingkan nilai *settling time* TFM sebesar 40 menit. Untuk uji kenaikan *set point* daya listrik didapatkan nilai *settling time* tercepat sebesar 19 menit, lebih cepat dibandingkan nilai BFM sebesar 20 menit, dan nilai TFM sebesar 34 menit. Dari hasil perhitungan tersebut, jelas bahwasannya strategi kontrol CCM memiliki keunggulan pada pengendali IC-100 dibanding strategi kontrol BFM, dan TFM.

“Halaman ini memang dikosongkan”

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan simulasi *tuning* IMC-PID pada pengendalian boiler-turbin berbasis strategi kontrol CCM maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut :

- a. Hasil nilai parameter λ dari *tuning* IMC-PID pada strategi kontrol CCM untuk *loop* pengendali LIC-100 sebesar 2 menit, kemudian untuk *loop* pengendali TIC-100 sebesar 3,5 menit, lalu untuk pengendali PIC-100 sebesar 10 menit, dan untuk pengendali IC-100 sebesar 3 menit.
- b. Berdasarkan hasil analisa performansi pengendali, didapatkan nilai performansi pengendali terbaik pada strategi kontrol CCM adalah pada *loop* IC-100.
- c. Nilai IAE IC-100 CCM untuk uji penurunan *set point* daya listrik sebesar 1173,77, sedangkan nilai IAE BFM sebesar 1204,46 dan nilai IAE TFM sebesar 4203,89. Untuk uji kenaikan *set point* daya listrik didapatkan nilai IAE CCM sebesar 1178,62, sedangkan nilai IAE BFM sebesar 1213,05, dan nilai IAE TFM sebesar 4070,83.
- d. Nilai *max. overshoot* IC-100 CCM pada uji penurunan *set point* daya listrik sebesar 0,263% , sedangkan nilai *max. overshoot* BFM sebesar 0,301% dan nilai *max. overshoot* TFM sebesar 2,7%. Berdasarkan uji kenaikan *set point* daya listrik, nilai *max. overshoot* IC-100 CCM sebesar 0,67% sama dengan nilai *max. overshoot* BFM, sedangkan nilai *max. overshoot* TFM sebesar 2,283%.
- e. Nilai *settling time* IC-100 CCM untuk uji penurunan *set point* daya listrik sebesar 21 menit, sama seperti nilai *settling time* BFM, sedangkan nilai *settling time* TFM sebesar 40 menit. Untuk uji kenaikan *set point* daya listrik didapatkan nilai *settling time* IC-100 CCM sebesar 19 menit, sedangkan nilai BFM sebesar 20 menit, dan nilai TFM sebesar 34 menit.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian *tuning* strategi kontrol pada boiler - turbin yaitu perlu adanya variasi metode *tuning* untuk ketiga mode strategi kontrol BFM, TFM, dan CCM agar diketahui metode *tuning* terbaik untuk ketiga strategi kontrol tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Biyanto, T. R., 2006. "Internal Model Control (IMC) – Neural Network (NN) Gain Scheduling Untuk Pengendalian Kolom Distilasi". **Jurnal Teknik Elektro, Universitas Kristen Petra**. Vol. 6 No. 1.
- Coughanour, D., 1991. **Process Systems Analysis & Control**. New York : McGraw-Hill.
- Gery, H.C., 1988. "The evolution of coordinated control". **Instrument Society of America**. Paper #88-0417, pp. 109-112.
- Hamid, Mohd. Kamarudin, A., 2007. **HYSYS : An Introduction to Chemical Engineering Simulation**. Johor : UTM.
- Hanyak, Michael, E. 2012. **Chemical Process Simulation, and The Aspen HYSYS Software**. Lewisburg : Dr. Michael E. Hanyak
- Marlin, T., 2000. **Process Control: Designing Processes and Control Systems for Dynamic Performance**. New York : McGraw Hill : New York.
- Morari, M., Zafiriou, E. 1989. **Robust Process Control**. Englewood, Cliffs, N.J : Prentice-Hall.
- Nelles O, Iserman, R., 1996. "Basis Function Networks for Interpolation of Local Linear Models". **Proc. of 35th Conference on Decision Control**.
- Ramirez, Raul, G., 2000. "Overall Intelligent Hybrid Control System For a Fossil-Fuel Power Unit". USA : Pennsylvania State University.
- Rivera, D. E., 2002. "PID Controller Tuning Using Internal Model Control : A Modern Approach". **Quality and Productivity Conference**.
- Seborg, D. E., Edgar, T. F., Mellichamp, D. A., 2004. **Process Dynamics and Control 2nd Edition**. New York : John Wiley & Sons.
- Sekretariat PT. ITS Kemitraan. 2013. **Study Evaluasi Waste Heat Power Generator dari Exit Gas Raw Mill**. Surabaya : PT. ITS Kemitraan

- Sekretariat Perusahaan PT. PLN. 2012. **Stasistik PLN 2011**. Jakarta : PT. PLN (Persero).
- Selvi, J. A. Vijaya, Radhakhrisnan, T. K., dan Sundaram, S., 2007. "Performance Assessment of PID and IMC Tuning Methods for a Mixing Process With Time Delay". **ISA Transactions** 46 (2007) 391-397
- Smuts, Jacques. 2010. "Improving Boiler Stability Through Advanced Regulatory Control". **ISA Automation Week**.
- Quazza, G., and E. Ferrari. 1972. "Role of power station control in overall system operation". **Proceedings Symposium on Real-Time Control of Electric Power Systems**. pp. 215-257.

LAMPIRAN

Tabel 1 Parameter analisa *open loop* pengendali

Parameter <i>Open Loop</i> Pengendali	
63,2% Nilai uji <i>open loop</i>	
$\theta_{\text{Loop Pengendali}}$	
$\tau_{\text{Loop Pengendali}}$	
$K_{\text{Loop Pengendali}}$	

Tabel 2 Parameter *tuning* IMC-PID

Parameter <i>Tuning</i> IMC-PID	
$\tau_{\text{Loop Pengendali}}$	
$\lambda_{\text{Loop Pengendali}}$	
$K_{\text{Loop Pengendali}}$	
K_c	
τ_I	

Tabel 3 Parameter *feedforward* pada mode pengendali PIC-100 *Coordinated Control Mode* (CCM)

Parameter <i>Tuning</i> FF-PIC-100-CCM	
$\tau_{\text{DISTURBANCE}} (\tau_2)$	
$\tau_{\text{PLANT}} (\tau_1)$	
$K_{\text{DISTURBANCE}}$	
K_{PLANT}	
K_F (Menit)	

Tabel 4 Analisa performansi *close loop* untuk *loop* pengendali pada strategi kontrol BFM, TFM, dan CCM

Strategi Kontrol	Analisa karakteristik <i>close loop</i> pengendali		
	IAE	Max. <i>Overshoot</i> (%)	Settling Time (Menit)
TFM			
BFM			
CCM			