



UNIVERSITAS INDONESIA

SIMULASI DINAMIK PIPA GAS CO₂ BERTEKANAN TINGGI

SKRIPSI

**KAHFI MONTAZERI
0806333221**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPATEMEN TEKNIK KIMIA
DEPOK
JUNI 2012**



UNIVERSITAS INDONESIA

SIMULASI DINAMIK PIPA GAS CO₂ BERTEKANAN TINGGI

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**KAHFI MONTAZERI
0806333221**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPATEMEN TEKNIK KIMIA
DEPOK
JUNI 2012**





KATA PENGANTAR

Segala puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah Subhanahu wa Ta'ala atas limpahan rahmat dan petunjuk-Nya sehingga makalah skripsi dapat selesai dengan baik dan tepat waktu. Shalawat berangkaikan salam tak lupa penulis hadiahkan kepada Rasulullah SAW yang selalu menjadi suri tauladan bagi hidup penulis. Penulisan makalah seminar dengan judul "**SIMULASI DINAMIK PIPA GAS CO₂ BERTEKANAN TINGGI**" dilakukan dalam rangka memenuhi mata kuliah Seminar. Penulisan makalah seminar ini tak lepas dari bantuan beberapa pihak. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Asep Handaya Saputra, M.Eng, sebagai pembimbing seminar yang telah membimbing dan mengarahkan penulis dalam menyusun makalah seminar ini;
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Widodo W. Purwanto, DEA, selaku Ketua Departemen Teknik Kimia FTUI;
3. Bapak Ir. Yuliusman, M.Eng, selaku kordinator skripsi Teknik Kimia FTUI;
4. Bapak Dr. Ir. Nelson Saksono, M.Eng, selaku pembimbing akademis;
5. Sahabat – sahabat terbaik penulis di kampus, yaitu Candrika Ajeng R, Sungging Hidayat, Iqlima Fuqoha dan Guntur Eko Putro.

Akhir kata penulis mengharapkan agar makalah seminar ini bermanfaat dalam pengembangan ilmu pengetahuan.

Depok, 5 Juli 2012

Penulis



ABSTRAK

Nama : Kahfi Montazeri

Program Studi : Teknik Kimia

Judul : Simulasi Dinamik Pipa Gas CO₂ Bertekanan Tinggi

Penelitian ini merupakan kegiatan untuk mencegah risiko pada pipa dengan simulasi dinamik untuk menganalisis proses transmisi CO₂ bertekanan tinggi. Tekanan tinggi diperlukan agar CO₂ berada dalam fase superkritik sehingga dapat diinjeksi ke dalam sumur kosong. Penelitian dilakukan dengan mendesain *valve* di sekitar *flowline* dan menentukan parameter *tuning* kontroler. Dari hasil simulasi dihasilkan perubahan tekanan (ΔP) di sepanjang pipa transmisi sebesar kurang lebih 204-240 psia dan di aliran kompresi CO₂ sebesar 548 psia dari tekanan awal. Dengan begitu, jenis pipa API 5L X56 dengan tebal pipa 1,250 inch cukup dapat digunakan serta harganya termurah dibandingkan dengan jenis pipa API 5L yang lain. Sementara spesifikasi ANSI 16.5 Class 2500 digunakan untuk komponen perpipaan di sepanjang pipa transmisi.

Kata kunci: ANSI 16.5, API 5L, CO₂ superkritik, Gas alam, Simulasi Dinamik

ABSTRACT

Name : Kahfi Montazeri

Study Program: Chemical Engineering

Title : Dynamic Simulation for High Pressure CO₂ Gas Pipe

This study is one of risk prevention activities using dynamic simulation to analyze the transmission of high-pressure CO₂ via pipeline. High pressure needed for CO₂ to be in its supercritical phase and able to be injected into depleted reservoir. This study is conducted by designing valve around the flowline and determining controller tuning parameters. From the results, pressure changes (ΔP) along the transmission pipeline are approximately 204-240 psia and in the *Kompresi CO₂* stream is at 548 psia. Therefore, API 5L X56 pipe with 1.250 in. wall thickness is enough to be used and the cost is the cheapest compared to another type of API 5L pipe. ANSI 16.5 Class 2500 is used for pipeline components specification along the transmission pipeline.

Keywords: ANSI 16.5, API 5L, Dynamic Simulation, Natural Gas, Supercritical CO₂

DAFTAR ISI

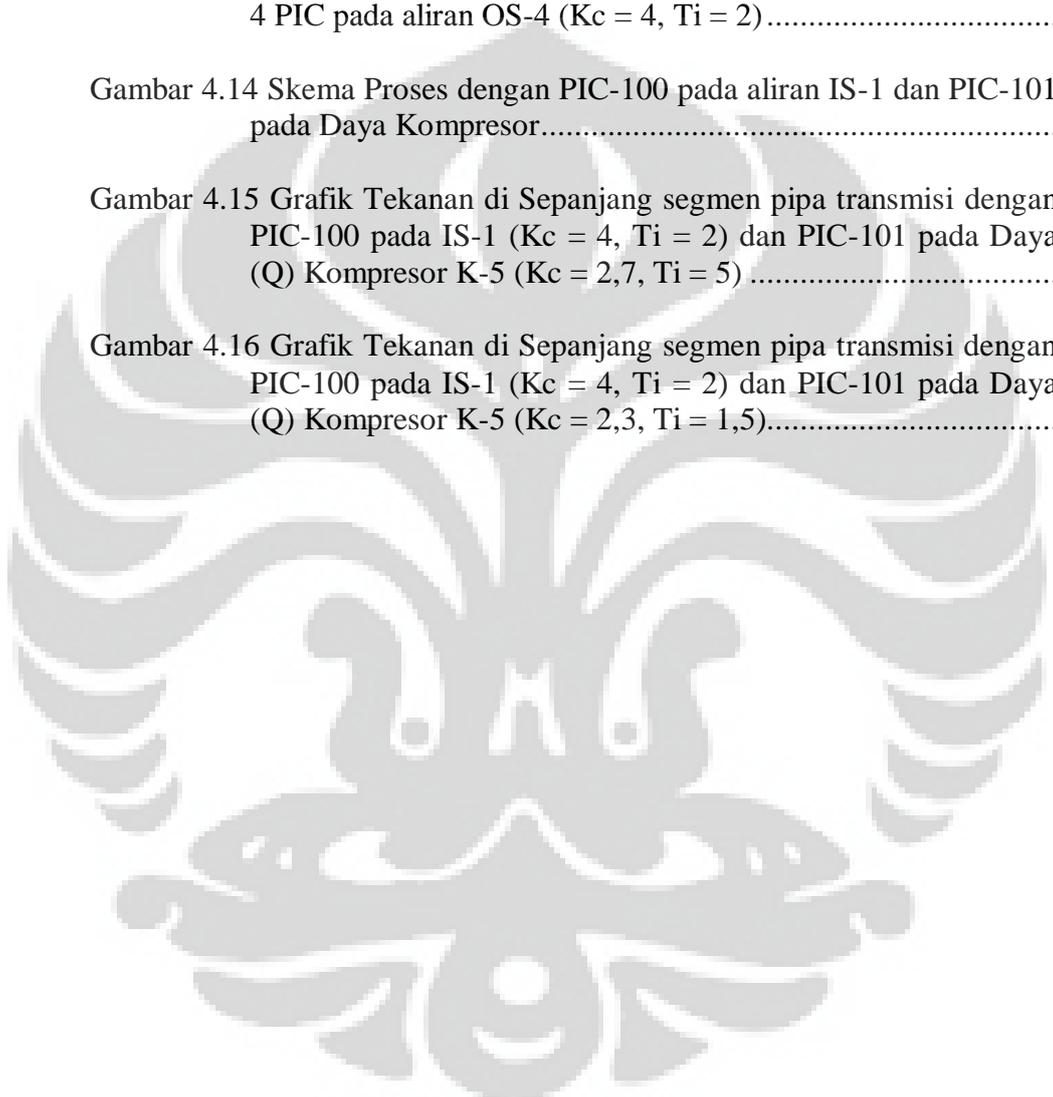
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Perancangan	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Sistematika Penulisan.....	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Proyek Blok Cepu	5
2.1.1 Kompresi dan Injeksi CO ₂	6
2.1.2 Jalur Injeksi CO ₂ dari <i>Gas Processing Facility</i> (GPF) menuju Sumur.....	6
2.2 Karbon Dioksida (CO ₂)	6
2.3 <i>Carbon Capture and Storage</i> (CCS)	8
2.4 Perpipaan	9
2.4.1 Komponen Sistem Perpipaan Transmisi Gas	10
2.4.2 Ukuran Pipa	14
2.5 Material <i>Carbon Steel</i> pada Pipa.....	15
2.6 <i>Specified Minimum Yield Strength</i> (SMYS)	16
2.7 Persamaan Desain Tekanan Internal	16
2.8 Standar Perpipaan.....	17
2.8.1 American Society of Mechanical Engineers	17
2.8.2 American National Standards Institute	18
2.8.3 API (<i>American Petroleum Institute</i>)	19
2.9 Simulasi Dinamik	20
2.9.1 Perbedaan antara <i>Steady State</i> dan Dinamik.....	20
2.9.2 Kontrol Tekanan dan Sistem Proteksi <i>Overpressure</i>	21
2.9.3 <i>Basic Control</i> dan Terminologi	21
2.9.4 <i>Final Control Element – Valve Dynamics</i>	24
2.9.5 Sistem Kontrol pada Kompresor.....	25
2.9.6 <i>Feedback Control</i>	27

2.9.7 Pemilihan Kontroler	29
2.9.8 Pemilihan Parameter <i>Tuning</i>	29
2.9.9 Metode Ziegler-Nichols (<i>Online</i>)	30
BAB 3 METODE PENELITIAN	31
3.1 Variabel Penelitian	31
3.2 Prosedur Penelitian	31
3.2.1 Prosedur Penelitian Besar	31
3.2.2 Prosedur Penelitian Rutin	34
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	38
4.1 Proses Dasar	38
4.2 CO ₂ Superkritis	39
4.3 Pipa <i>Carbon Steel</i>	39
4.4 Simulasi Dinamik	40
4.4.1 Desain <i>Valve</i> disekitar <i>Flowline</i>	42
4.4.2 Sistem Kontrol yang Saling Berhubungan diantara VLV-100 dan Kompresor K-5	56
4.4.3 Konfigurasi Optimal untuk Pipa Transmisi Gas CO ₂	61
4.5 Rekomendasi Spesifikasi Pipa dan Biaya Pipa	61
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	63
5.1 Kesimpulan	63
5.2 Saran	63
DAFTAR REFERENSI	64

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Peta Wilayah Kerja Blok Cepu.....	5
Gambar 2.2 Diagram Fase Karbon Dioksida	7
Gambar 2.3 Teknologi <i>Carbon Capture and Storage</i> (CCS).....	9
Gambar 2.4 <i>Check valve</i> dan <i>Block valve</i>	11
Gambar 2.5 <i>Open Loop Control</i>	22
Gambar 2.6 <i>Feedback Loop Control</i>	22
Gambar 2.7 Karakteristik Digital On/Off	28
Gambar 3.1 Diagram Alir Tahapan Penelitian Besar	32
Gambar 3.2 Diagram Alir Tahapan Penelitian Rutin.....	35
Gambar 4.1 <i>Pipe Layout</i> yang digunakan untuk Simulasi Dinamik	38
Gambar 4.2 Grafik Tekanan di Sepanjang segmen pipa transmisi Jika Tidak Terdapat Kontroler.....	43
Gambar 4.3 Skema Proses dengan PIC berada di OS-4	45
Gambar 4.4 Grafik Tekanan di Sepanjang segmen pipa transmisi dengan PIC-100 di OS-4 ($K_c = 4$ dan $T_i = 2$)	47
Gambar 4.5 Skema Proses dengan PIC pada aliran OS-3	47
Gambar 4.6 Skema Proses dengan PIC pada aliran OS-2	48
Gambar 4.7 Skema Proses dengan PIC pada aliran OS-1	49
Gambar 4.8 Skema Proses dengan PIC pada aliran IS-1	50
Gambar 4.9 Grafik Tekanan di Sepanjang segmen pipa transmisi dengan PIC pada aliran IS-1 ($K_c = 4$ dan $T_i = 2$).....	50

Gambar 4.10 Skema Proses dengan 2 PIC pada aliran OS-4 dengan VLV-100 dan VLV-101	51
Gambar 4.11 Grafik Tekanan di Sepanjang segmen pipa transmisi dengan 2 PIC pada aliran OS-4 ($K_c = 4$, $T_i = 2$)	52
Gambar 4.12 Skema Proses dengan 4 PIC pada aliran OS-4	53
Gambar 4.13 Grafik Tekanan di Sepanjang segmen pipa transmisi dengan 4 PIC pada aliran OS-4 ($K_c = 4$, $T_i = 2$)	53
Gambar 4.14 Skema Proses dengan PIC-100 pada aliran IS-1 dan PIC-101 pada Daya Kompresor	57
Gambar 4.15 Grafik Tekanan di Sepanjang segmen pipa transmisi dengan PIC-100 pada IS-1 ($K_c = 4$, $T_i = 2$) dan PIC-101 pada Daya (Q) Kompresor K-5 ($K_c = 2,7$, $T_i = 5$)	58
Gambar 4.16 Grafik Tekanan di Sepanjang segmen pipa transmisi dengan PIC-100 pada IS-1 ($K_c = 4$, $T_i = 2$) dan PIC-101 pada Daya (Q) Kompresor K-5 ($K_c = 2,3$, $T_i = 1,5$)	59



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Jalur Pipa dan Parameter Perpipaan	6
Tabel 2.2 Karakteristik CO ₂ Murni.....	7
Tabel 2.3 Standar CO ₂ untuk EOR dan rekomendasi untuk CCS	9
Tabel 2.4 NPS dan Ukuran Pipa DN	14
Tabel 2.5 Rating Kelas Pipa Berdasarkan ASME B16.5 dan Desain PN yang Berhubungan.....	15
Tabel 2.6 Kode ASME B31.8.....	18
Tabel 2.7 Jenis Material Pipa API 5LX dan SMYS	19
Tabel 2.8 Spesifikasi yang digunakan Industri untuk Operasi yang Meliputi CO ₂	19
Tabel 2.9 Metode Ziegler-Nichols.....	30
Tabel 4.1 Data Teknis Perpipaan.....	38
Tabel 4.2 Hasil Simulasi Skenario 1.....	55
Tabel 4.3 Hasil Simulasi Skenario 2.....	60
Tabel 4.4 Perhitungan Ketebalan Pipa Sesuai dengan SMYS	62
Tabel 4.5 Perhitungan Biaya <i>Carbon Steel</i>	62

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A Standar Perpipaan	xiv
LAMPIRAN B Parameter ASME B31.8	xvii
LAMPIRAN C Hasil Simulasi	xix



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Gas alam adalah bahan bakar fosil berbentuk gas yang terutama terdiri dari metana (CH_4), banyak ditemukan di ladang minyak dan gas alam dalam jumlah besar serta di dasar tambang batubara dalam jumlah kecil (*Coal Bed Methane*), atau dalam bentuk *natural gas hydrate* (NGH). Gas alam (CH_4) berada dalam bentuk campuran dengan senyawa hidrokarbon lain, terutama etana, propana, butana dan pentana. Disamping itu, gas alam juga mengandung uap air, hidrogen sulfida (H_2S), karbon dioksida (CO_2), helium, nitrogen, dan senyawa lain.

Indonesia memiliki sumur gas alam yang berada di Blok Cepu, Jawa Timur. Cadangan gas di Blok Cepu ini mencapai 1 *triliun cubic feet* (TCF) dengan kandungan CO_2 yang tinggi (28-33%) dan produksi gas nantinya sekitar 330 MMSCFD (Petrominer, 2011). Dengan kata lain, CO_2 yang mengalir nantinya berkisar 82-110 MMSCFD. Kandungan CO_2 yang cukup banyak ini memerlukan penanganan lebih lanjut karena CO_2 merupakan salah satu dari gas rumah kaca yang dapat mengakibatkan *global warming*. Jika zat ini terpapar dalam konsentrasi yang cukup banyak di lapisan atmosfer bumi, perubahan iklim dapat terjadi secara drastis yang disertai naiknya permukaan laut (Volk, 2008).

Saat ini, ada beberapa teknologi yang digunakan untuk mengurangi kadar CO_2 di atmosfer pada kegiatan di dunia migas, salah satunya adalah *carbon capture and storage* (CCS). *Carbon Capture and Storage* (CCS) adalah teknologi untuk mereduksi CO_2 yang memiliki prinsip kerja dengan menangkap CO_2 dari sumur migas ataupun industri lalu di simpan di dalam tanah ataupun di dasar laut. Teknologi CCS telah diidentifikasi sebagai teknologi yang dapat mengurangi emisi CO_2 ke atmosfer (*venting*) secara signifikan. Salah satu jenis CCS ini adalah dengan menggunakan sumur gas/minyak yang telah kosong sebagai tempat penyimpanan CO_2 , atau biasa disebut *geological sequestration*. Penyimpanan CO_2 di dalam tanah (*geological sequestration*) dapat dilakukan untuk memenuhi persyaratan Protokol Kyoto.

Saat ini, penggunaan pipa menjadi sarana utama transportasi CO₂ dari *point-of-capture* ke sumur (misalnya, reservoir yang telah kosong) di mana CO₂ akan disimpan secara permanen. Akan tetapi terdapat beberapa pendapat bahwa pemindahan CO₂ melalui pipa tidak mewakili hambatan yang signifikan untuk menerapkan CCS pada skala besar (Barrie dkk, 2006). Sedikitnya pengalaman industri untuk penerapan CCS daripada penerapan penggunaan pipa untuk hidrokarbon (misalnya, gas alam) dan sejumlah isu serta risiko terkait yang perlu cukup dipahami secara efektif karena risiko pada jaringan pipa CO₂ mungkin lebih besar daripada risiko pada jaringan pipa hidrokarbon (Parfomak, 2007). Namun terdapat salah satu kegiatan pencegahan risiko yang cukup efektif dapat dilakukan, yaitu dengan melalui analisis dinamik tekanan pada pipa (Liljemark, 2011).

Untuk kasus di Blok Cepu ini, pada waktu tertentu CO₂ akan diinjeksikan kembali ke dalam sumur menggunakan *flowline* yang sudah ada. Sebelum di injeksi, CO₂ harus dikompresi hingga tekanan 3.627 psig (247 bar) untuk mencapai kondisi superkritis. Kondisi ini diperlukan agar CO₂ tidak mengalami perubahan fase selama proses pemindahan melalui pipa sepanjang 20 km. Oleh karena itu dibutuhkan pipa dengan material yang kuat untuk mencapai sumur injeksi tersebut. Pipa yang panjang serta mengalirkan gas CO₂ dengan tekanan yang cukup besar menghasilkan bahaya/risiko yang harus diperhatikan secara cermat (Liljemark, 2011).

Salah satu kegiatan pencegahan risiko yang dapat dilakukan adalah dengan melalui analisis simulasi dinamik tekanan pada pipa. Simulasi dinamik telah menjadikan proses pemindahan CO₂ melalui perpipaan yang tidak aktual menjadi cukup realistis untuk mengevaluasi risiko dari fase transisi selama aliran transien dan perubahan kondisi pada pipa (Liljemark, 2011). Sesuai dengan tujuh obyektiif pengendalian proses, yaitu untuk keselamatan (*safety*), proteksi lingkungan, proteksi peralatan, operasi yang lancar, kualitas produk, meningkatkan profit, memonitor dan mendiagnosis, kegiatan ini dapat memberikan pemahaman yang lebih baik untuk fenomena yang terjadi selama pengangkutan CO₂ dari titik pengambilan ke titik penyimpanan dari proses *carbon capture and storage* (CCS).

Analisis dilakukan dengan menggunakan simulator untuk melihat karakteristik tekanan dalam pipa saat suatu kejadian yang dapat mengganggu operasional terjadi. Dengan menganalisis hasil simulasi dinamik diharapkan pencegahan risiko akan menghasilkan penentuan spesifikasi dan standar pipa serta *specified minimum yield strength* (SMYS) untuk pipa yang akan digunakan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijabarkan pada sub bab 1.1, maka yang menjadi rumusan masalah yaitu grafik tekanan di sepanjang pipa transmisi yang dihasilkan oleh simulasi dinamik saat *emergency shutdown valve* pada ujung pipa secara tiba-tiba ditutup.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penulisan skripsi ini diantaranya adalah,

- Melihat karakteristik tekanan di sepanjang segmen pipa transmisi transmisi
- Menentukan *Specified Minimum Yield Strength* (SMYS) pipa
- Menentukan spesifikasi/standar pipa yang akan digunakan
- Menentukan sistem kontrol.

1.4 Batasan Masalah

Analisis dinamik ini ditulis dengan mempunyai batasan-batasan sebagai berikut:

- Sumber CO₂ yang digunakan berasal dari Blok Cepu.
- Data-data primer, seperti tekanan, laju alir, komposisi aliran, berasal dari laporan Studi Pembangunan Fasilitas Lapangan Jambaran-Tiung Biru, Blok Cepu.
- *Flowline* sepanjang 20 km.
- *Pressure drop* di sepanjang pipa transmisi diabaikan karena tidak berdampak signifikan pada simulasi dinamik.
- Material pipa yang digunakan adalah *carbon steel* API 5L.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam skripsi ini adalah:

BAB I: PENDAHULUAN

Bab ini terdiri atas latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, pembatasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II: TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menjelaskan teori-teori dasar mengenai CO₂, perpipaan, standar perpipaan dan simulasi dinamik.

BAB III: METODE PENELITIAN

Bab ini terdiri atas metode penelitian meliputi tahap-tahap studi literatur seperti Diagram Alir dan rancangan penelitian.

BAB IV: HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menampilkan hasil simulasi yang diikuti dengan pembahasan hasil simulasi secara komprehensif.

BAB V: KESIMPULAN

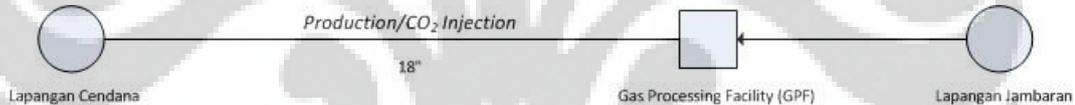
Bab ini merupakan kesimpulan dari hasil simulasi dan pembahasan yang telah dilakukan sebelumnya.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab tinjauan pustaka ini, akan dijabarkan beberapa pembahasan mengenai proyek Gas Blok Cepu, karakteristik kompresi gas karbon dioksida, perpipaan, analisis dinamik dan proses simulator.

2.1 Proyek Blok Cepu

Indonesia akan mengembangkan Lapangan Gas Jambaran, Tiung Biru, dan Cendana di Wilayah Kerja (WK) Blok Cepu yang terletak di dekat perbatasan Provinsi Jawa Timur, Indonesia. Blok Cepu mempunyai cadangan gas alam sekitar 1 TCF (*trillion cubic feet*) dengan laju aliran umpan sebesar 330 MMSCFD, tekanan sebesar 450 psia, temperatur sekitar 190°F, komposisi CO₂ sebesar 28-33%, H₂S sebesar 50.000 ppm dan *heating value* sebesar 900-1.100 BTU (Lemtek UI, 2012).



Gambar 2.1 Pipa Gas CO₂

Pada waktu tertentu CO₂ akan diinjeksi ke sumur yang terletak di lapangan Cendana melalui pipa sepanjang 20 km dan tekanan sekitar 3.627 psia untuk disimpan di sumur minyak yang telah kosong di Lapangan Cendana (gambar 2.1). Pipa yang cukup panjang dan bertekanan besar ini memungkinkan terjadinya kerusakan atau kecelakaan pada pipa sehingga untuk mencegah hal ini simulasi dinamik diperlukan untuk menganalisis lokasi dimana kecelakaan dapat terjadi.

2.1.1 Kompresi dan Injeksi CO₂

CO₂ yang dipisahkan dari *acid gas* pada unit AGE (*Acid Gas Enhancer*) mempunyai tekanan sekitar 28,7 psia dan suhu 127 °F. Selama masa awal produksi gas, CO₂ akan diinsinerasi dengan menggunakan *thermal oxidizer* untuk menghancurkan mercaptan dan H₂S. Saat CO₂ akan mulai di injeksi, gas ini

dikompres hingga tekanan 3.627 psia dengan melewati lima tahap kompresi untuk mencapai kondisi superkritis. Selanjutnya CO₂ superkritis akan di kirim menuju sumur di lapangan Cendana yang telah kosong untuk di simpan (*geological sequestration*). Sementara itu, air yang digunakan pada tahap awal kompresi akan di kirim menuju unit *produced water storage* (Lemtek UI, 2012).

2.1.2 Jalur Injeksi CO₂ dari *Gas Processing Facility* (GPF) menuju Sumur

Sistem injeksi CO₂ akan diinstal dari *Gas Processing Facility* menuju Cendana *wellpads*. Setelah sumur *reservoir* Cendana benar-benar kosong, jalur aliran produksi sumur Cendana akan di konversi menjadi pipa injeksi CO₂ untuk mengirim CO₂ dari *gas processing facility* menuju Cendana *wellpads* untuk re-injeksi dan penyimpanan. Pipa berdiameter 450 mm (18 in) akan terkoneksi dengan *production header* dan jalur pipa tambahan akan mengoneksi *the header* dengan setiap sumur injeksi (Lemtek UI, 2012).

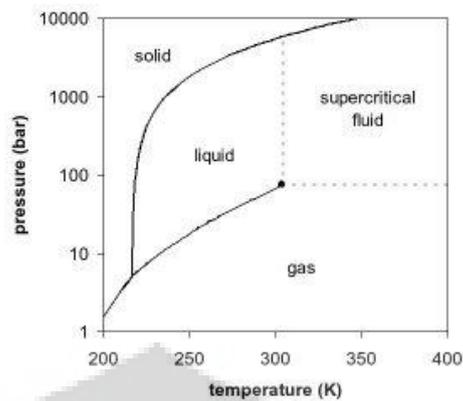
2.2 Karbon Dioksida (CO₂)

Karbon dioksida (CO₂) adalah senyawa kimia non-polar terdiri dari dua atom oksigen terikat secara kovalen dengan sebuah atom karbon tunggal (O = C = O). Pada tekanan dan suhu ambien, CO₂ murni berwujud tidak berwarna dan pada konsentrasi rendah gas ini tidak berbau. Sifat fisik fundamental dari CO₂ murni tercantum dalam Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Karakteristik CO₂ Murni

Sumber: http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_Dioxide

Propertis	Unit	Nilai
Berat Molekul	g/mol	44,01
Tekanan Kritis	bar	73,8
Suhu Kritis	°C	31,1
<i>Triple point pressure</i>	bar	5,18
<i>Triple point temperature</i>	°C	-56,6
Kelarutan dalam Air, 25°C, 1 bar	g/L	1,45
Densitas Gas, 0°C, 1 bar	kg/m ³	1,98
Densitas pada Titik Kritis	kg/m ³	467
Densitas Cairan, 0°C, 70 bar	kg/m ³	995
Kalor Laten saat Vaporisasi	kJ/kg	571



Gambar 2.2 Diagram Fasa Karbon Dioksida

Sumber: http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_Dioxide

Pada tekanan dan suhu atmosfer, fasa karbon dioksida yang stabil adalah uap. Gambar 2.2 menunjukkan densitas CO₂ murni sebagai fungsi temperatur dan tekanan operasi pada pipa. Secara umum, pengaruh suhu dan tekanan pada densitas harus dipertimbangkan dalam optimasi kapasitas pipa. Perlu dicatat juga bahwa berbagai jenis komponen kimia lainnya dalam aliran CO₂ mungkin mempengaruhi densitas massanya.

Titik kritis CO₂ merupakan suhu dan tekanan tertinggi dimana CO₂ dapat berada dalam fasa uap dan cair dalam kesetimbangan. Dalam kondisi superkritis, densitas CO₂ akan berkisar 50-80% dari densitas cairnya. Viskositas CO₂ superkritis mirip dengan fasa gas, yang bisa sampai 100 kali lebih rendah dari dalam fasa cair. Dalam *geological sequestration*, CO₂ harus diinjeksikan ke dalam sumur dengan diberikan pada tekanan yang tepat, biasanya sekitar 70-100 bar atau lebih. Karena titik kritis untuk CO₂ adalah 31,1 °C dan 73,8 bar, tekanan sistem lebih dari 75 bar akan mengakibatkan pemindahan CO₂ dalam kondisi superkritis, selama suhu tetap di atas 31,1 °C. Gambar 2.2 menunjukkan diagram fasa untuk CO₂. Jika tekanan turun di bawah tekanan kritis, fasa yang mungkin adalah cairan atau gas (atau keduanya) tergantung pada suhu.

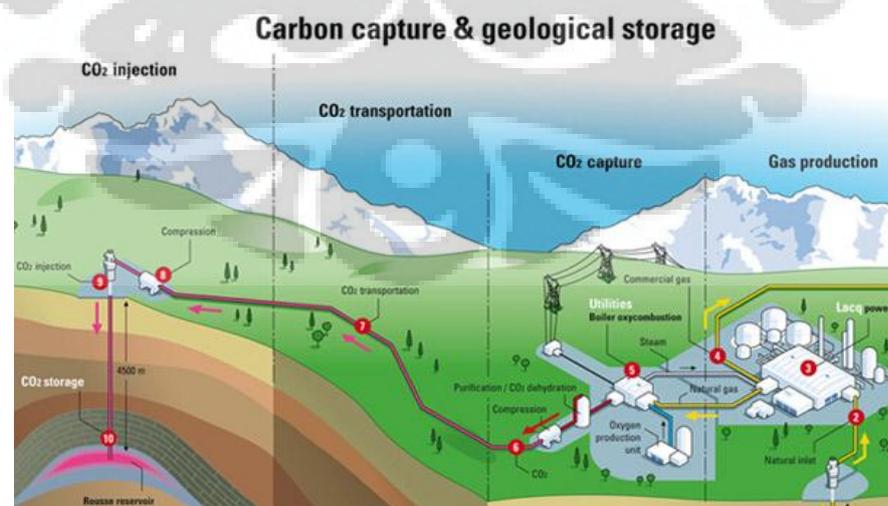
Untuk transmisi CO₂ yang dimulai dalam kondisi superkritis pada inlet, CO₂, mencapai fasa gas di beberapa titik di sepanjang segmen pipa transmisi karena penurunan tekanan. Dengan pipa diameter konstan, kecepatan CO₂ meningkat sepanjang segmen pipa transmisi sehingga menaikkan penurunan tekanan atau "choking" pada jarak tertentu. Panjang pipa maksimum yang aman

untuk mencegah *choking* adalah sekitar 10% kurang dari titik *choking*. Untuk menghindari kondisi *choking*, perlu dilakukan *recompression* CO₂.

Pada umumnya, fluida diharapkan dapat melewati pipa tetap dalam fasa yang sama dan densitas fluida tidak berubah dengan cepat dalam proses perpindahan. Untuk kasus adiabatik terdapat diskontinuitas dalam profil densitas. Diskontinuitas ini sesuai dengan keadaan jenuh ketika CO₂ merubah densitas dengan cepat, misalnya dari keadaan *subcooled* menjadi keadaan dua fasa. Bahkan bagi fluida superkritis ketika tidak ada perubahan fasa, variasi densitas memiliki daerah yang sangat non-linear. Dengan suhu di atas titik awal superkritis, densitas CO₂ berubah secara tiba-tiba didalam pipa saat suhu mencapai titik jenuh, dan muncul aliran dua fasa. Implikasinya adalah *recompression* akan diperlukan secara dengan tahap yang lebih pendek untuk menjauh dari aliran dua fasa.

2.3 Carbon Capture and Storage (CCS)

Carbon Capture and Storage (CCS) merupakan salah satu teknologi mitigasi pemanasan global dengan cara mengurangi emisi CO₂ ke atmosfer. Teknologi ini merupakan rangkaian pelaksanaan proses yang terkait satu sama lain, mulai dari pemisahan dan penangkapan (*capture*) CO₂ dari sumber emisi gas buang (*flue gas*), pengangkutan CO₂ tertangkap ke tempat penyimpanan (*transportation*), dan penyimpanan ke tempat yang aman (*storage*).



Gambar 2.3 Teknologi *Carbon Capture and Storage* (CCS)

Sumber: <http://static.theurbn.com/wp-content/uploads/2011/06/CCS.jpg>

Berbagai teknik dan upaya monitoring terus dikembangkan dengan tujuan agar dapat terus memonitor dan mendeteksi kondisi CO₂ yang telah diinjeksikan ke dalam bumi. Demikian pula pada saat ini berbagai rancangan aturan yang universal untuk pemanfaatan *storage* ini tengah disusun. Diperkirakan kapasitas penyimpanan CO₂ di formasi geologi di seluruh dunia mencapai sekitar 200 hingga 2.000 GtCO₂.

Tabel 2.3 Standar CO₂ untuk EOR dan rekomendasi untuk CCS

Sumber: De Visser et al, 2008

Parameter	Nilai Batas		Alasan
	EOR	CCS	
CO ₂	>95%	>95,5%	Tekanan minimum <i>miscible</i> untuk EOR
N ₂	<4%	<4%	Tekanan minimum <i>miscible</i> untuk EOR
Hidrokarbon	<5%	<4%	Tekanan minimum <i>miscible</i> untuk EOR
H ₂ O	<650ppm	<500ppm	Korosi
O ₂	<10ppm	-	Korosi atau reaksi dengan <i>odorant</i>
H ₂ S	<10-200ppm	<200ppm	Korosi atau kepentingan kesehatan
Total sulfur	<1500ppm	-	Keamanan
Glycol	<4 x 10 ² ml/m ³	-	Operasi
Suhu	<48,9°C	-	Batas Operasi Material

Walaupun secara umum teknologi CCS ini cukup menjanjikan untuk dipergunakan dalam menangani sumber emisi CO₂ yang besar seperti pembangkit listrik berbahan bakar fosil atau industri besar lainnya, masih banyak hal-hal yang perlu diselesaikan sebelum CCS dapat diterapkan secara penuh, seperti perbaikan teknologi, standarisasi (Tabel 2.3) dan pembiayaan.

2.4 Perpipaian

Pipa adalah sebuah tabung dengan penampang bulat yang sesuai dengan persyaratan dimensi ASME B36.10M *Welded and Seamless Wrought Steel Pipe* serta ASME B36.19M *Stainless Steel Pipe*. Jalur perpipaian adalah sebuah pipa

yang dipasang untuk tujuan transmisi gas, cairan, *slurries*, dan lain-lain, dari suatu sumber atau sumber pasokan untuk satu atau lebih pusat distribusi atau untuk satu atau lebih besar volume pelanggan.

Perpipaan termasuk pipa, *flanges*, *fitting*, perbautan, gasket, *valve*, dan tekanan yang mengandung bagian-bagian dari komponen perpipaan lainnya. Ini juga termasuk gantungan pipa dan pendukung lainnya yang diperlukan untuk mencegah *overpressurization* dan *overstressing*. Kode ASME harus digunakan untuk menentukan tekanan desain maksimum pipa atau flensa. Hal ini biasanya diasumsikan bahwa aliran CO₂ diinjeksi tidak akan mengandung air bebas, dan akan disuntikkan sebagai fase tunggal. Secara teoritis, *carbon steel* dapat digunakan untuk konstruksi pipa karena kandungan air rendah dari CO₂ superkritis.

2.4.1 Komponen Sistem Perpipaan Transmisi Gas

Sistem perpipaan transmisi gas terdiri atas beberapa komponen sebagai berikut:

2.4.1.1 Pipa

Pipa merupakan komponen utama dalam sistem perpipaan. Pipa berfungsi sebagai tempat mengalirnya gas. Dalam menggunakan pipa, beberapa hal yang perlu dipertimbangkan adalah *pressure loss*, kecepatan gas, diameter, ketebalan, diameter pipa, dan jenis material pipa. Ukuran pipa harus cukup besar untuk mengalirkan fluida pada tekanan dan kecepatan tertentu.

Material pipa harus dapat menjaga struktur pipa di bawah kondisi lingkungan tertentu, secara kimia sesuai dengan fluida yang disalurkan, dan memenuhi syarat sesuai dengan aplikasinya. Beberapa jenis material pipa yang biasa digunakan pada pipa transmisi adalah *carbon steel*, *cast iron*, dan *stainless steel*. Persentase besar terdapat pada penggunaan pipa yang menggunakan material jenis logam (besi, bijih besi, atau tembaga).

Spesifikasi umum mengenai diameter nominal, diameter luar, diameter dalam, *schedule*, ketebalan dinding, berat, dan tekanan maksimum pipa untuk pipa

baja karbon yang berdasarkan standar ANSI. Diameter nominal adalah diameter pipa yang dipilih untuk pemasangan atau komersial.

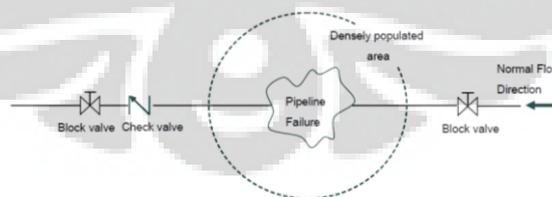
Schedule pipa sebenarnya dapat dikelompokkan menjadi *schedule* 5, 10, 20, 30, 40, 60, 100, 120, dan 160 yang meliputi *schedule standard* (ST), *schedule extra strong* (XS), *schedule double extra strong* (XXS), dan *schedule special*. Pembagian pipa ke dalam beberapa *schedule* ditujukan untuk:

1. Menahan tekanan internal dari aliran
2. Menunjukkan kekuatan dari bahan pipa
3. Mengatasi karat
4. Mengatasi kegetasan pipa

Ketebalan pipa tergantung dari *schedule* pipa itu. Semakin besar *schedule* pipa, maka semakin besar ketebalan pipa tersebut, sehingga tekanan maksimum gas yang dapat mengalir di dalamnya menjadi lebih besar.

2.4.1.2 Valve

Valve berfungsi antara lain sebagai pengatur laju alir fluida, pengendali arah aliran fluida, serta pengurang dan pengendali tekanan pada sistem perpipaan distribusi. Tipe *valve* yang banyak dipakai dalam sistem perpipaan distribusi gas adalah *control valve*, *block valve* dan *emergency shutdown valve*. Material *valve* yang biasa digunakan dalam sistem perpipaan distribusi gas adalah *carbon steel* dan PE.



Gambar 2.4 *Check valve* dan *Block valve*

a. *Control valves*

Control valve adalah *valve* yang digunakan untuk mengatur aliran yang akan dilewati sesuai dengan *set point* yang di tugaskan padanya, sebagai salah

satu parameter pengendali *control valve* ini bisa berupa tekanan, aliran, suhu, level, dan lain-lain sesuai dengan sensor elemen yang terdapat pada *control valve* tersebut.

Control valve ini dapat bekerja secara kerja elektris, posisi buka tutup *valve* bekerja berdasarkan sinyal listrik yang diberikan oleh elemen sensor yang terdapat padanya, biasanya pada jenis ini digunakan kontroler bisa berupa PLC, DCS, atau mikrokontroler sebagai unit pengolah datanya.

b. *Block Valves*

Untuk pipa di darat (*onshore*), persyaratan lokasi dan kinerja intermediate *block valve* harus didasarkan pada persyaratan lokal (jika ada) dan strategi manajemen risiko, diantaranya adalah:

- Ketika tertutup, *block valve* mengurangi volume produk yang dilepas pada kasus kegagalan pipa penahan
- *Block valve* meningkatkan maintainabilitas pada bagian pembatas pipa yang memerlukan *depressurization*
- Efektivitas *block valve* untuk membatasi skala kebocoran akan tergantung pada pendeteksian kebocoran yang efektif.
- *Block valve* akan menutup berdasarkan sinyal yang biasanya berasal dari sistem kontrol, baik secara manual maupun otomatis.

c. *Emergency Safety Valve*

Sebuah *emergency safety valve* (ESDV) adalah *valve* digerakkan dirancang untuk menghentikan aliran cairan atau hidrokarbon (gas) yang berbahaya saat terdeteksi kemungkinan terjadinya kecelakaan. Hal ini dapat memberikan perlindungan terhadap bahaya yang mungkin bagi manusia, peralatan atau lingkungan. ESDV merupakan bagian dari sistem instrumentasi keselamatan. Proses ini memberikan perlindungan keselamatan otomatis saat terdeteksi kemungkinan terjadinya kecelakaan, yang disebut Keselamatan Fungsional.

ESDV sangat terkait dengan industri minyak bumi ataupun industri lain yang mungkin memerlukan jenis sistem perlindungan ini. ESDV diwajibkan oleh hukum pada setiap peralatan yang ditempatkan pada rig pengeboran lepas pantai

untuk mencegah peristiwa bencana seperti ledakan BP Horizon di Teluk Meksiko pada tahun 2010 silam.

2.4.1.3 *Valve Box*

Valve box digunakan sebagai tempat meletakkan *valve*. *Valve box* terbuat dari besi dengan ketebalan minimum 3/16 inci.

2.4.1.4 *Pressure Regulator*

Pressure regulator digunakan untuk menurunkan tekanan gas di dalam pipa agar mencapai tekanan yang diperlukan oleh konsumen. *Pressure regulator* terbuat dari besi. *Regulator* harus mempunyai sebuah *single port* dengan diameter *orifice* yang tidak lebih besar daripada diameter yang telah direkomendasikan oleh manufacturer pada tekanan maksimum. Selain itu, regulator yang dipilih harus mampu untuk dinaikkan batas tekanannya hingga 50% lebih besar daripada tekanan kondisi normal.

2.4.1.5 *Meter*

Pada sistem perpipaan gas dengan tekanan tinggi, sistem *meter* dilengkapi dengan *valve* dan *pressure regulator* untuk menjaga kestabilan aliran. Beberapa tipe yang penting dari *meter* yang paling banyak digunakan adalah sebagai berikut:

1. *Turbine/rotary flowmeter*

Merupakan tipe *meter* dimana terdapat roda atau turbin yang dirotasikan oleh aliran gas. Besarnya laju turbin di konversi menjadi jumlah gas yang mengalir tiap satuan waktu.

2. *Orifice flowmeter*

Merupakan *meter* pengukur gas yang menggunakan perbedaan tekanan fluida ketika melewati kepingan *orifice*.

2.4.1.6 *Fittings*

Fungsi dari *fitting* antara lain untuk menyambung pipa, mengubah arah aliran, memperbesar atau memperkecil jalur pipa. *Fitting* dapat terbuat dari

berbagai macam bahan, diantaranya adalah besi, kuningan, PE, dan PVC. *Fitting* disambungkan ke pipa dengan pengelasan dan ulir.

2.4.2 Ukuran Pipa

Ukuran pipa nominal (NPS) adalah penanda ukuran pipa yang tidak berdimensi. Hal ini menunjukkan ukuran pipa standar bila diikuti dengan jumlah penanda ukuran tertentu tanpa simbol inci. Diameter nominal (DN) juga merupakan penanda berdimensi ukuran pipa dalam sistem satuan metrik. Hal ini menunjukkan ukuran pipa standar bila diikuti dengan jumlah penanda ukuran tertentu tanpa simbol milimeter. Lihat Tabel 2.4 untuk NPS dan setara ukuran pipa DN.

Tabel 2.4 NPS dan Ukuran Pipa DN

Sumber: Pipeline Rule of Thumb Handbook (5th Ed), 2002

NPS	DN	NPS	DN	NPS	DN	NPS	DN
1/8	6	3 1/2	90	22	550	44	1100
1/4	8	4	100	24	600	48	1200
3/4	10	5	125	26	650	52	1300
1/2	15	6	150	28	700	56	1400
3/4	20	8	200	30	750	60	1500
1	25	10	250	32	800	64	1600
1 1/4	32	12	300	34	850	68	1700
1 1/2	40	14	350	36	900	72	1800
2	50	16	400	38	950	76	1900
2 1/2	65	18	450	40	1000	80	2000
3	80	20	500	42	1050	—	—

2.4.2.1 Ketebalan Dinding Pipa

Schedule dinyatakan dalam angka (5, 5S, 10, 10S, 20, 20S, 30, 40, 40S, 60, 80, 80, 100, 120, 140, 160). Angka *schedule* ini menunjukkan nilai perkiraan dari 1000 P/S, di mana P adalah tekanan dan S adalah tegangan yang diijinkan, keduanya dinyatakan dalam *pound per square inch* (psi). Angka *schedule* yang lebih tinggi berarti semakin tebal pipa tersebut. Diameter luar dari masing-masing ukuran pipa telah distandarisasi. Oleh karena itu, ukuran pipa nominal tertentu akan memiliki diameter dalam yang berbeda, bergantung pada angka *schedule* yang ditentukan.

2.4.2.2 Klasifikasi Perpipaan

Pengklasifikasikan pipa sesuai dengan *rating* sistem tekanan dan suhu yang digunakan untuk mengklasifikasikan *flanges*. Namun, *rating* tidak harus diatur oleh *rating* tekanan-suhu dari tekanan terendah dalam pipa. Tabel 2.5 menunjukkan daftar peringkat kelas pipa standar berdasarkan ASME B16.5 bersama dengan *pression nominal* (PN) *rating*.

Pression nominal (PN) adalah penanda *rating* yang diikuti oleh sejumlah sebutan yang menunjukkan perkiraan *rating* tekanan dalam bar. Tabel 2.5 menyediakan desain PN yang berhubungan dari peringkat kelas ASME untuk *designators rating* PN. Selain itu, pipa dapat diklasifikasikan berdasarkan *rating* kelas yang dicakup oleh standar ASME lain, seperti ASME B16.1, B16.3 B16.24, dan B16.42.

Tabel 2.5 Rating Kelas Pipa Berdasarkan ASME B16.5 dan
Desain PN yang Berhubungan

Sumber: Pipeline Rule of Thumb Handbook (5th Ed), 2002

Class	150	300	400	600	900	1500	2500
PN	20	50	68	110	150	260	420

2.5 Material Carbon Steel pada Pipa

Baja didefinisikan sebagai paduan besi dengan tidak lebih dari 2,0 persen berat karbon. Dari beberapa jenis baja, *carbon steel* merupakan jenis baja yang paling banyak digunakan untuk perpipaan CO₂. Sebuah baja yang memiliki sifat yang khas terutama pada karbon (yang dibedakan dari unsur-unsur lain) yang terdapat dalam komposisinya. Baja dianggap *carbon steel* bila tidak ada konten minimum yang ditentukan atau diperlukan untuk aluminium, boron, krom, kobalt, columbium, molibdenum, nikel, titanium, tungsten, vanadium atau zirkonium atau elemen lainnya yang ditambahkan untuk memperoleh efek paduan yang diinginkan.

Secara harfiah ada ratusan nilai tempa baja dengan variasi dari berbagai komposisi. Yang paling sederhana dari kelas-kelas ini dikenal sebagai *carbon steel* biasa, dengan komposisi karbon bervariasi antara sekitar 0,05 dan 1,0 persen.

Pada variasi ini menghasilkan tiga kelompok umum sesuai dengan kandungan karbon, yang didefinisikan sebagai berikut:

1. *Low carbon steels* 0,05 hingga 0,25 persen karbon
2. *Medium carbon steels* -0,25 menjadi 0,50 persen karbon
3. *High carbon steels* -0,50 persen dan kandungan karbon yang lebih besar

Paduan baja umumnya dianggap baja dengan satu atau lebih elemen paduan (selain karbon) telah ditambahkan untuk memberikan sifat khusus yang berbeda dibandingkan dengan *carbon steel* biasa.

2.6 Specified Minimum Yield Strength (SMYS)

Yield strength diukur dalam satuan tekanan "psi," merupakan karakteristik dari pipa baja. SMYS adalah stres (tekanan) di mana pipa mengalami deformasi permanen. SMYS singkatan *Specified Minimum Yield Strength*, yaitu, besaran stres yang digunakan untuk menghitung ketebalan dinding pipa yang diperlukan agar dapat mempertahankan tekanan internal tertentu. Biasanya, SMYS dipilih sekitar 40 sampai 72 persen dari *yield strength*. Dengan mengetahui ketebalan dinding pipa, SMYS memungkinkan untuk dapat di hitung.

2.7 Persamaan Desain Tekanan Internal

Pada subbab ini, modifikasi dari persamaan Barlow digunakan untuk mendesain pipa gas. Bentuk persamaan Barlow berikut digunakan untuk sistem transportasi minyak dan gas untuk menghitung tekanan internal yang diperbolehkan dalam pipa berdasarkan diameter tertentu, tebal dinding, dan material pipa (ASME, 1995).

$$P = \frac{2tSEFT}{D} \quad (2.1)$$

dimana:

P = desain tekanan internal pipa, psig

D = diameter luar pipa, in.

T = ketebalan dinding pipa, in.

S = *specified minimum yield strength* (SMYS) material pipa, psig

$E = \text{seam joint factor}$, 1,0 untuk pipa *seamless* dan *submerged arc welded* (SAW)

$F = \text{design factor}$, dengan *range* 0,4-0,72 bergantung pada kelas yang ditentukan

$T = \text{temperature deration factor} = 1,00$ untuk suhu dibawah 250°F

2.8 Standar Perpipaan

Sistem perpipaan terbuat dari komponen seperti pipa, *flanges*, *supports*, gasket, baut, *valve*, *strainers*, fleksibel dan sendi ekspansi. Komponen dapat dibuat dalam berbagai bahan, dalam berbagai jenis dan ukuran dan dapat diproduksi dengan standar nasional umum atau menurut manufaktur. Kode dan standar perpipaan dari organisasi standarisasi diantaranya:

- ANSI
- ASME
- API, dan lain-lain.

2.8.1 American Society of Mechanical Engineers (ASME)

American Society of Mechanical Engineers (ASME) adalah salah satu organisasi terkemuka di dunia yang mengembangkan dan menerbitkan kode dan standar. ASME didirikan pada tahun 1911 sebuah komite untuk merumuskan aturan untuk pembangunan boiler uap dan bejana tekan lainnya. Selain itu, ASME telah membentuk komite lain yang mengembangkan kode dan standar lainnya, seperti ASME B31, Kode untuk Tekanan Perpipaan.

2.8.1.2 ASME B31.8: Gas Transmission and Distribution Piping Systems

Sebuah jalur pipa atau jalur transmisi didefinisikan sebagai pipa yang mentransmisikan gas dari sumber atau sumber pasokan untuk satu atau lebih besar volume pelanggan atau ke pipa yang digunakan untuk menghubungkan sumber pasokan. ASME B31.8 mengatur persyaratan untuk fabrikasi desain, pengujian instalasi, dan aspek keselamatan operasi dan pemeliharaan transmisi gas dan sistem perpipaan distribusi, termasuk jaringan pipa gas, stasiun kompresor gas, metering gas dan stasiun peraturan, listrik gas, dan layanan ke outlet perakitan set meteran pelanggan.

Tabel 2.6 Kode ASME B31.8

Sumber: ASME B31.8, 1995

Kode	Lokasi	Safety Factor	Percent of Yield	Desain pada min. atau ketebalan dinding nominal	Allowance for excess pressure	Frekuensi valve utama	Range suhu normal	Special Remarks
ASME B31.8 2007	Kelas 1 Div 1	1,25	80	Nominal	Kurang dari 10% untuk <i>overpressure</i> atau 75% dari SMYS	Kelas 1 20 miles	-20°F hingga 450°F (<i>derating</i> diatas 250°F)	Kelas 1: Gurun atau Pedesaan Kelas 2: Pinggiran Kota Kelas 3: Perumahan dan Komersial Kelas 4: Pusat kota, gedung bertingkat
	Kelas 1 Div 2	1,4	72			Kelas 2 15 miles		
	Kelas 2	1,7	60			Kelas 3 10 miles		
	Kelas 3	2,0	50			Kelas 4 5 miles		
	Kelas 4	2,5	40					

Persyaratan ASME B31.8 juga berlaku untuk penggunaan elemen sistem perpipaan, termasuk tetapi tidak terbatas pada pipa, *valve*, *fitting*, *flanges*, perbautan, gasket, regulator, *pressure vessel*, peredam getaran, dan *relief valves*.

2.8.2 American National Standards Institute

Standar ini mengatur *flanges* pipa, diameter dalam dan luar, *bolt circles*, bilangan dan diameter *Weld neck*, *threaded*, *Slip-on*, *Lap joint*, *Socket weld* dan *Blind flanges*. Seiring berjalannya waktu, standar ANSI menjadi dikenal sebagai standar ASME, namun ASME tetap harus melalui persetujuan dari ANSI tersebut. Terdapat beberapa Standar ANSI yang dipakai dalam industri minyak dan gas, diantaranya:

- a. ASME/ANSI Class 400
- b. ASME/ANSI Class 600
- c. ASME/ANSI Class 900
- d. ASME/ANSI Class 1500

Kualitas baja karbon dan *stainless steel* berdasarkan ASME B16.5 Tabel 1A (Tabel A1 dan A2 pada LAMPIRAN).

2.8.3 API (American Petroleum Institute)

American Petroleum Institute, sering disebut sebagai API, API 5L mengacu to pada API 5L *line pipe*, yang meliputi minyak, gas, air, yang diangkut oleh pipa ke pipa minyak dan gas industri. API 5L *line pipe* termasuk pipa baja *seamless* dan pipa baja las. *Line pipe grade* dan komposisi kimia API 5L dapat dibagi menjadi API 5L PSL 1 dan API 5L PSL 2, termasuk API 5L PSL 1 level and kategorinya adalah A, B, X42, X46, X52, X56, X60, X65, X70, X80, dan X90 (lihat tabel 2.7).

Tabel 2.7 Jenis Material Pipa dan SMYS

Sumber: 44th Edition API 5LX, 2010

Pipe Material API 5LX Grade	Specified Minimum Yield Strength (SMYS), psi
X42	42,000
X46	46,000
X52	52,000
X56	56,000
X60	60,000
X65	65,000
X70	70,000
X80	80,000
X90	90,000

Selain itu, standar yang ada dan panduan praktek terbaik untuk menangani CO₂, sebagian besar dikembangkan untuk kebutuhan industri minyak dan gas, memerlukan modifikasi (Tabel 2.8).

Tabel 2.8 Spesifikasi yang digunakan Industri untuk Operasi yang Meliputi CO₂

Sumber: *Material Selection for Supercritical CO₂ Transport*, 2010

Spesifikasi	Nama/Judul	Keterangan
49 CFR 195	Transportasi cairan berbahaya melalui pipa	Hanya valid untuk pipa transportasi untuk CO ₂ superkritis
NACE TM0297-2008	Efek dekompresi CO ₂ pada suhu tinggi dan tekanan tinggi pada material elastomerik	Hanya valid untuk CO ₂ >99%. Suhu dan tekanan tes dalam <i>range</i> superkritis, tapi tidak valid untuk CO ₂ dengan impuritis
API Spec 5L dan 5LD	Spesifikasi untuk <i>line pipe</i> dan spesifikasi untuk CRA atau <i>lined steel pipe</i>	Hanya dipakai untuk perpipaan di sumur dan lapangan
ASME B31.4 dan B31.8	Transportasi untuk cairan dan gas melalui perpipaan	B31.8 secara spesifik <i>excludes</i> pipa membawa CO ₂ , sementara B31.4 tidak secara spesifik memasukkan CO ₂ ke dalam urutan fluida.

2.9 Simulasi Dinamik

Simulasi dinamik dapat membantu pembuatan desain yang lebih baik, mengoptimalkan, dan mengoperasikan proses kimia atau pabrik penyulingan. Suatu pabrik tidak pernah benar-benar dalam kondisi *steady state*. Gangguan pada umpan dan lingkungan, *fouling* pada alat penukar panas, dan degradasi katalitik terus mengganggu kondisi proses yang berjalan.

Dengan simulasi dinamik, kita dapat memastikan bahwa pabrik dapat menghasilkan produk yang diinginkan dengan cara yang aman dan mudah dioperasikan. Dengan mendefinisikan spesifikasi peralatan rinci dalam simulasi dinamik, kita dapat memverifikasi bahwa peralatan tersebut berfungsi seperti yang diharapkan dalam situasi pabrik yang sebenarnya.

Di sisi lain, model dinamik menggunakan persamaan konservasi yang berbeda dengan menjelaskan perubahan yang terjadi dari waktu ke waktu. Persamaan untuk neraca massa, energi, dan komposisi termasuk istilah "akumulasi" tambahan yang dibedakan terhadap waktu. Persamaan diferensial non-linear dapat dirumuskan dengan prinsip-prinsip konservasi, namun tidak terdapat solusi analitis.

2.9.1 Perbedaan antara *Steady State* dan Dinamik

Spesifikasi yang digunakan oleh unit operasi dalam mode Dinamik tidak sama sebagai modus *steady state*. Bagian ini menguraikan perbedaan utama antara dua mode tersebut dalam hal menentukan operasi unit.

2.9.1.1 *Steady State*

Mode *Steady State* menggunakan operasi modular yang digabungkan dengan algoritma non-sequensial. Informasi diproses segera setelah diberikan. Hasil perhitungan apapun secara otomatis disebarkan di seluruh *flowsheet*.

Neraca massa, energi, dan komposisi dianggap pada waktu yang sama. Tekanan, aliran, suhu, dan komposisi dianggap sama. Misalnya, spesifikasi *overhead* aliran kolom diganti dengan spesifikasi komposisi dalam kondensor. Kolom dapat mengikuti spesifikasi tersebut dengan baik.

2.9.1.2 Dynamics

Neraca massa, energi dan komposisi dalam mode Dinamik dianggap tidak pada waktu yang sama. Neraca bahan atau aliran tekanan diselesaikan setiap waktu. Neraca energi dan komposisi dalam keadaan *default* agar tidak selalu *solve*. Tekanan dan aliran dihitung secara bersamaan dalam matriks *pressureflow*. Neraca energi dan komposisi diselesaikan secara modular berurutan.

Spesifikasi suhu dan komposisi harus menjadi masukan pada setiap aliran batas umpan yang memasuki *flowsheet* tersebut. Suhu dan komposisi kemudian dihitung secara berurutan untuk setiap unit operasi di hilir dan aliran massa menggunakan model *holdup*. Tidak seperti dalam mode *Steady State*, informasi tidak diproses segera setelah diinput. Integrator harus dijalankan setelah penambahan dari setiap unit operasi untuk *flowsheet* tersebut. Setelah integrator dijalankan, kondisi aliran untuk aliran keluar dari unit operasi yang telah ditambah akan langsung dihitung.

2.9.2 Kontrol Tekanan dan Sistem Proteksi *Overpressure*

Sistem proteksi tekanan harus mencegah tekanan internal pada setiap titik dalam pipa naik ke tingkat yang berlebihan. Sistem proteksi tekanan terdiri dari sistem kontrol tekanan, sistem keamanan tekanan dan instrumentasi yang terkait dan sistem alarm. Tujuan dari sistem kontrol tekanan adalah untuk mempertahankan tekanan operasi dalam batas yang dapat diterima selama operasi normal. Selain itu juga untuk memastikan bahwa tekanan desain tidak dilampaui pada setiap titik dalam sistem perpipaan selama operasi normal.

2.9.3 *Basic Control* dan Terminologi

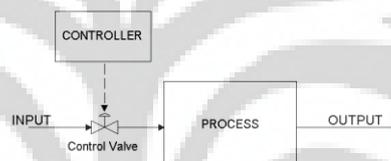
Kontroler PIC adalah alat utama yang dapat digunakan untuk memanipulasi dan mengendalikan variabel proses dalam simulasi dinamik. Skema kontrol umpan balik dapat dilakukan dengan memodifikasi parameter *tuning* dalam operasi Kontrol PIC. *Tuning* parameter dapat dimodifikasi dengan memasukkan proporsional, integral, dan derivatif ke kontroler. Sebuah kontrol Digital On/Off juga tersedia.

2.9.3.1 Disturbansi

Sebuah distorbansi mengganggu sistem proses dan menyebabkan variabel output berubah dari *set point* yang diinginkan. Variabel gangguan tidak dapat dikontrol atau dimanipulasi oleh proses. Struktur kontrol harus menjelaskan semua gangguan yang secara signifikan dapat mempengaruhi proses. Distorbansi terhadap proses dapat diukur atau terukur.

2.9.3.2 Open Loop Control

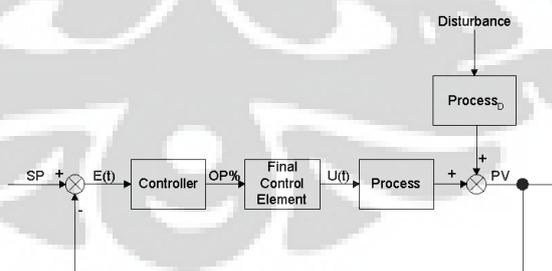
Respon *loop* terbuka dari proses ditentukan dengan memvariasikan input ke sistem dan mengukur respon keluaran. Respon *loop* terbuka ke sistem orde pertama dari input ditunjukkan pada Gambar 2.5. Dalam kontrol *loop* terbuka, *controller* mengatur input ke proses tanpa sepengetahuan variabel output yang menutup *loop* dalam skema kontrol umpan balik.



Gambar 2.5 Open Loop Control

2.9.3.3 Feedback Control (Closed Loop)

Kontrol umpan balik ini dicapai dengan mengumpan balik informasi proses output ke kontroler.



Gambar 2.6 Feedback Loop Control

Kontroler ini menggunakan informasi yang ada tentang variabel proses untuk menentukan tindakan apa yang harus diambil untuk mengatur variabel proses. Ini adalah struktur kontrol sederhana dan paling banyak digunakan dalam sistem proses kimia.

Kontrol umpan balik dapat mempertahankan variabel output, PV, pada *set point* yang telah ditentukan, SP. Ada beberapa langkah dasar yang dilakukan oleh kontroler untuk mencapai hal ini:

1. Mengukur variabel output, PV.
2. Bandingkan nilai yang terukur, PV, dengan nilai set point yang diinginkan, SP. Hitung error, $E(t)$, antara dua nilai. Definisi kesalahan tergantung pada apakah controller *direct* atau *reverse*.
3. Masukkan error, $E(t)$, ke persamaan kontrol umum. Nilai persentase bukaan yang diinginkan dari kontrol *valve*, OP%, akan dihitung.
4. Nilai% OP akan diteruskan ke elemen kontrol akhir yang menentukan input ke proses, $U(t)$.
5. Seluruh prosedur diulang.

Persamaan umum kontrol untuk sebuah kontrol PIC adalah (Marlin, 2000):

$$OP(t) = K_c E(t) + \frac{K_c}{T_i} \int E(t) + K_c T_d \frac{dE(t)}{dt} \quad (2.2)$$

dimana:

OP(t) = output kontroler saat waktu t

E(t) = error saat waktu t

K_c = *proportional gain* kontroler

T_i = *integral (reset) time* kontroler

T_d = *derivative (rate) time* kontroler

2.9.3.4 Direct and Reverse Acting

Input ke kontroler umpan balik disebut error atau perbedaan antara variabel proses output dan set point. Error didefinisikan secara berbeda tergantung pada apakah proses memiliki *gain* positif atau negatif yang stabil. Untuk proses dengan *gain* positif yang stabil, error harus didefinisikan sebagai *reverse acting* (AspenTech, 2003).

$$E(t) = SP(t) - PV(t) \quad (2.3)$$

dimana:

SP(t) = *set point*

PV(t) = nilai variabel proses output

Jika PV naik diatas SP, OP atau input kepada proses akan menurun. Jika PV turun di bawah SP, nilai OP akan naik.

Untuk proses dengan *gain* negatif, error harus diset pada aksi *direct* (AspenTech, 2003),

$$E(t) = PV(t) - SP(t) \quad (2.4)$$

Sehingga jika PV naik diatas SP, nilai OP atau input kepada proses akan ikut naik. Jika PV turun dibawah SP, nilai OP juga ikut turun.

2.9.4 Final Control Element – Valve Dynamics

Valve dinamik dapat ditentukan saat terjadi penurunan tekanan atau sebuah hubungan aliran tekanan. Kontrol terhadap tekanan dan level dapat dicapai yang terbaik adalah menggunakan spesifikasi tekanan bagian hilir masing-masing *valve*. Persentase bukaan masing-masing *valve* kemudian dapat digunakan untuk mengontrol aliran melalui *valve* masing-masing dengan kontroler PID.

Terdapat beberapa pilihan untuk menentukan sejumlah mode dinamik yang berbeda untuk *valve*. Berikut ini adalah daftar mode dinamik yang tersedia untuk operasi *valve*:

1. *Instantaneous*

Pada mode ini, aktuator bergerak secara instan terhadap posisi %OP yang diinginkan dari kontroler.

2. *First Order*

First order dapat dimodelkan dalam respon posisi aktuator terhadap perubahan %OP yang diinginkan. *First order* juga dapat dimodelkan dalam respon posisi *valve* aktual terhadap perubahan posisi *actuator*.

3. *Linear*

Aktuator dimodelkan terhadap %OP yang diinginkan pada *rate* yang konstan.

2.9.4.1 Tipe Valve

Kecepatan aliran melalui *control valve* bervariasi sebagai fungsi dari persen bukaan *valve* dan jenis *valve*. Jenis *valve* dapat didefinisikan lebih mudah

dengan menyatakan aliran sebagai persentase, CV (0% jika tidak ada aliran dan 100% jika kondisi aliran maksimum). Ada tiga jenis karakteristik *valve*, yaitu (AspenTech, 2003),

1. *Linear*

Control valve dengan karakteristik *valve* linear mempunyai aliran yang secara langsung proporsional terhadap persentase bukaan *valve*.

$$\% CV = \% \text{ persentase bukaan } valve \quad (2.5)$$

2. *Quick Opening*

Control valve dengan karakteristik *valve* bukaan cepat dapat memperoleh aliran yang lebih besar pada saat awal pembukaan *valve* yang kecil. Setelah *valve* terbuka lebih besar, aliran naik pada *rate* yang lebih kecil.

$$\% CV = (\% \text{ persentase bukaan } valve)^{0.5} \quad (2.6)$$

3. *Equal Percentage*

Control valve dengan karakteristik ini dapat memperoleh aliran yang kecil pada saat awal pembukaan *valve* yang rendah. Namun, aliran dapat naik secara cepat saat *valve* dibuka secara penuh.

$$\% CV = (\% \text{ persentase bukaan } valve)^3 \quad (2.7)$$

2.9.5 Sistem Kontrol pada Kompresor

Empat metode pengendalian banyak digunakan untuk mengendalikan kinerja kompresor, diantaranya:

- Variabel kontrol kecepatan
- *Suction throttling*
- *Adjustable inlet guide vanes (IGV)*
- *By-pass – Discharge throttling*

2.9.5.1 Variabel Kontrol Kecepatan

Variabel kontrol kecepatan kompresor bergantung pada hubungan aerodinamis yang disebut hukum *fan* yang menyatakan bahwa,

$$\dot{V} \propto N, \quad y_p \propto N^2, \quad \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \propto N^2, \quad (T_2 - T_1) \propto N^2 \quad (2.8)$$

Keuntungan menggunakan variabel kecepatan kompresor untuk mengontrol kinerja kompresor adalah:

- Beban efisiensi tinggi (lebih besar dari 95% dari efisiensi desain) saat kompresor hanya menghasilkan *head* yang diperlukan saat terjadi beban.
- Kemungkinan untuk *overload* sistem (dengan aliran volum) karena *over-speed*
- Cocok untuk semua jenis kompresor

Kerugian utamanya adalah *driver* dengan variasi kecepatan diperlukan. Namun, untuk sebagian besar aplikasi kontrol variasi kecepatan merupakan pilihan pertama (Lüdtke, 2004).

2.9.5.2 Suction Throttling

Sebuah *throttling valve* yang terpasang di sisi *suction* dapat dianggap sebagai bagian integral dari kompresor. Keuntungan untuk *throttling suction* adalah:

- Cocok untuk semua jenis kompresor
- Biaya investasi yang relatif rendah dibandingkan dengan variabel kontrol kecepatan.

Kelemahan utamanya adalah:

- Rendahnya efisiensi pada bagian-beban karena kehilangan energi dalam *throttling valve*
- *Overload* tidak mungkin.

Namun, akibat dari efisiensi yang rendah pada bagian-beban, *throttling valve* banyak digunakan terutama karena sederhana dan biaya investasi yang rendah (Lüdtke, 2004).

2.9.5.3 Adjustable Inlet Guide Vanes (IGV)

Penyesuaian IGV adalah variasi *head* kompresor yang berkebalikan dengan *throttling valve*. Dengan menyesuaikan IGV, sudut datang pada impeller inlet dapat diubah dan dengan demikian kecepatan *peripheral* berubah. Sifat

penting dari IGV ini hanya kinerja impeller berkaitan yang terpengaruhi. Keuntungan bagi yang disesuaikan IGV adalah:

- Efisiensi medium pada bagian-beban (lebih rendah dari variasi kecepatan, lebih tinggi dari *throttling valve*)
- Dengan *prerotation* negatif dari IGV, kegiatan ini mungkin bisa digunakan untuk sistem overload.

Kelemahan utama adalah biaya investasi yang lebih tinggi dari *throttling valve*, terutama dalam situasi untuk menempatkan IGV untuk lebih dari satu tahap (Asro, 2008).

2.9.5.4 *By-pass – Discharge Throttling*

Kontrol *By-pass* juga disebut sebagai *discharge throttling*. Aliran di-*by passed* dari keluaran kompresor menuju inlet kompresor melalui *valve*. Keuntungan untuk kontrol *by-pass* adalah:

- Cocok untuk semua jenis kompresor dan impeller
- Kontrol sederhana dengan biaya investasi yang rendah

Kerugian utama adalah energi yang tinggi pada bagian-beban dan tidak mungkin untuk sistem *overload* (Asro, 2008).

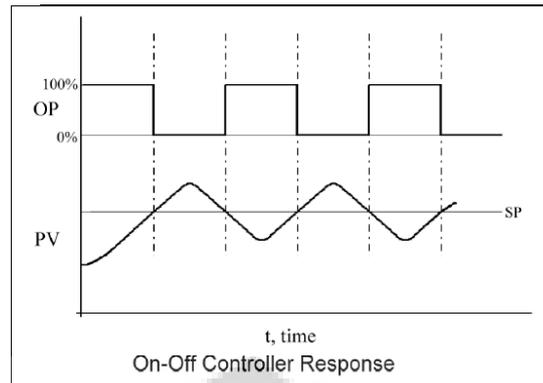
2.9.6 *Feedback Control*

2.9.6.1 *Digital On/Off*

Kontrol digital On/Off adalah salah satu bentuk yang paling dasar dari penggunaan kontrol. Tombol kontroler On/Off merupakan kontroler yang sesuai jika penyimpangan dari *set point* berada dalam rentang yang dapat diterima dan siklus tidak mengacaukan seluruh proses (Gambar 2.7).

Jika OP menunjukkan ON, opsi diset ke " $PV < Threshold$ ", output kontroler berubah pada saat PV turun di bawah *set point*.

$$OP\ 0\% = \text{for } PV > SP \text{ and } OP = 100\% \text{ for } PV < SP \quad (2.9)$$



Gambar 2.7 Karakteristik Digital On/Off

Sumber: AspenTech, 2003

Jika kebalikannya yaitu saat OP menunjukkan ON, opsi di set ke “PV > *Threshold*”.

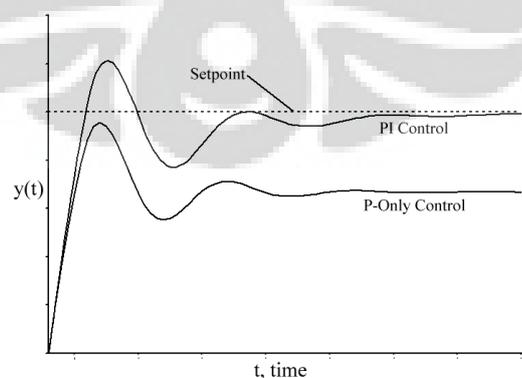
$$OP = 0\% \text{ for } PV < SP \text{ and } OP = 100\% \text{ for } PV > SP \quad (2.10)$$

2.9.6.2 Proportional Integral Control (PI)

Tidak seperti kontroler proporsional (P), kontroler proporsional + integral dapat meredam osilasi keluar dan mengembalikan variabel proses pada set point. Output dari kontroler proporsional + integral didefinisikan sebagai (Marlin, 2000):

$$OP(t) = K_c E(t) + K_c/T_i \int E(t) \quad (2.11)$$

Respon loop tertutup dari proses dengan kontrol PI dan kontrol P ditampilkan pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Kontrol Proporsional dan PI

Sumber: AspenTech, 2003

Istilah integral berfungsi untuk membawa error menjadi nol dalam skema kontrol. Semakin banyak tindakan integral, semakin lambat respon dari *controller*. Integral terus bergerak untuk menghilangkan error. Waktu integral, T_i , didefinisikan sebagai jumlah waktu yang dibutuhkan untuk output kontroler untuk memindahkan jumlah yang setara dengan error. Karena hubungan antara T_i dan tindakan kontrol berupa timbal balik, peningkatan T_i menghasilkan tindakan integral yang berkurang, sementara pengurangan T_i menghasilkan tindakan integral yang lebih besar. Waktu integral harus dikurangi (peningkatan aksi integral) hanya cukup dengan mengembalikan variabel proses ke *set point*. Setiap tindakan lebih hanya berfungsi untuk memperpanjang waktu respon.

Kontroler PI cocok jika *offset* tidak dapat ditoleransi. Mayoritas kontroler di pabrik proses kimia berada di bawah kontroler PI karena menggabungkan akurasi (tidak ada *offset*) dengan waktu respon yang relatif cepat. Namun, aksi integral yang ditambahkan sebagai pendorong destablisasi dapat menyebabkan osilasi dalam sistem dan menyebabkan sistem kontrol menjadi tidak stabil.

2.9.7 Pemilihan Kontroler

Umumnya, suatu sistem loop tertutup yang efektif diharapkan agar stabil dan membuat proses variabel pada akhirnya mencapai nilai sama dengan set point. Sebuah kontroler yang agresif (*tightly tuned*) dapat memberikan kinerja yang baik, tapi tidak mampu untuk merubah proses. Sebuah kontroler yang lamban (*sluggishly tuned*) dapat memberikan kinerja yang buruk, tapi sangat kuat. Hal ini cenderung membuat proses menjadi stabil.

Secara umum, jika *offset* bisa ditoleransi, kontroler proporsional harus digunakan. Jika ada *noise* yang signifikan, atau jika ada *dead time* yang signifikan dan/atau kapasitas kecil dalam proses, kontroler PI harus digunakan. Jika tidak ada *noise* yang signifikan dalam proses, kapasitas dari sistem ini besar dan tidak ada *dead time*, kontrol PID adalah pilihan tepat.

2.9.8 Gas Pressure Controller Tuning

Tidak ada satu pun cara yang benar untuk tuning kontroler. Tujuan untuk mengontrol adalah untuk memberikan 'kompromi' antara kinerja dan ketahanan

dalam respon loop tertutup. Kontrol yang lebih ketat dan kinerja yang lebih baik dapat dicapai dengan meningkatkan *gain*. Penurunan *controller gain* menghasilkan respon yang lebih lambat, tapi lebih stabil.

Kapasitas kontrol tekanan didominasi dengan terdapat *dead time*. Akibatnya, *gain* kontroler tinggi dapat diimplementasikan dengan sedikit kemungkinan terjadi ketidakstabilan. *Gain* kontroler, K_c , dapat diset antara 2 dan 10 dan waktu integral, T_i , dapat diset antara 2 dan 10 menit (AspenTech, 2003).

2.9.9 Metode Ziegler-Nichols (*Online*)

Metode ini digunakan untuk menentukan nilai K_c dan T_i untuk kontroler PI dengan bantuan simulasi. Berikut ini adalah langkah-langkah percobaannya:

- a. Set kontroler:
 - Automatik
 - Proporsional saja (T_i maksimum, $T_d = 0$)
- b. Ubah-ubah harga K_c atau PB (Proportional Band = $100/K_c$) hingga responnya beresilasi penuh atau siklik:
 - K_c yang didapatkan disebut K_{cu} (*ultimate controller gain*)
 - Hitung periode osilasinya (T_u)

Tabel 2.9 Metode Ziegler-Nichols

Sumber: Marlin, 2000

Tipe Kontroler		Proportional gain (K_c)	Integral time (T_i)	Derivative time (T_d)
Proportional	P	$K_{cu}/2$	-	-
Proportional-Integral	PI	$K_{cu}/2.2$	$T_u/1.2$	-
Proportional-Integral-Derivative	PID	$K_{cu}/1.7$	$T_u/2$	$T_u/8$

BAB 3

METODE PENELITIAN

Metode penelitian dibagi menjadi dua, yaitu penelitian besar dan penelitian rutin. Penelitian besar mencakup keseluruhan penelitian dari awal hingga akhir. Sementara penelitian rutin merupakan penelitian yang dapat dilakukan setiap saat. Berikut ini adalah penjelasan lengkap dari bagian-bagian tersebut dan diagram alirnya.

3.1 Variabel Penelitian

Dalam penelitian ini terdapat data-data variabel terikat dan variabel bebas yang saling terkait satu sama lainnya dalam simulasi dinamik dan hasil dari simulasi tersebut yang berupa grafik.

- **Variabel bebas:** Dalam simulasi dinamik, variabel bebas berupa waktu (t) yang terus berubah selama simulasi dinamik berjalan.
- **Variabel terikat:** Dalam simulasi ini, variabel terikat berupa tekanan di sepanjang pipa transmisi. Variabel ini dapat menentukan SMYS dan spesifikasi pipa yang akan digunakan. Dengan begitu pencegahan terhadap risiko dapat dilakukan.

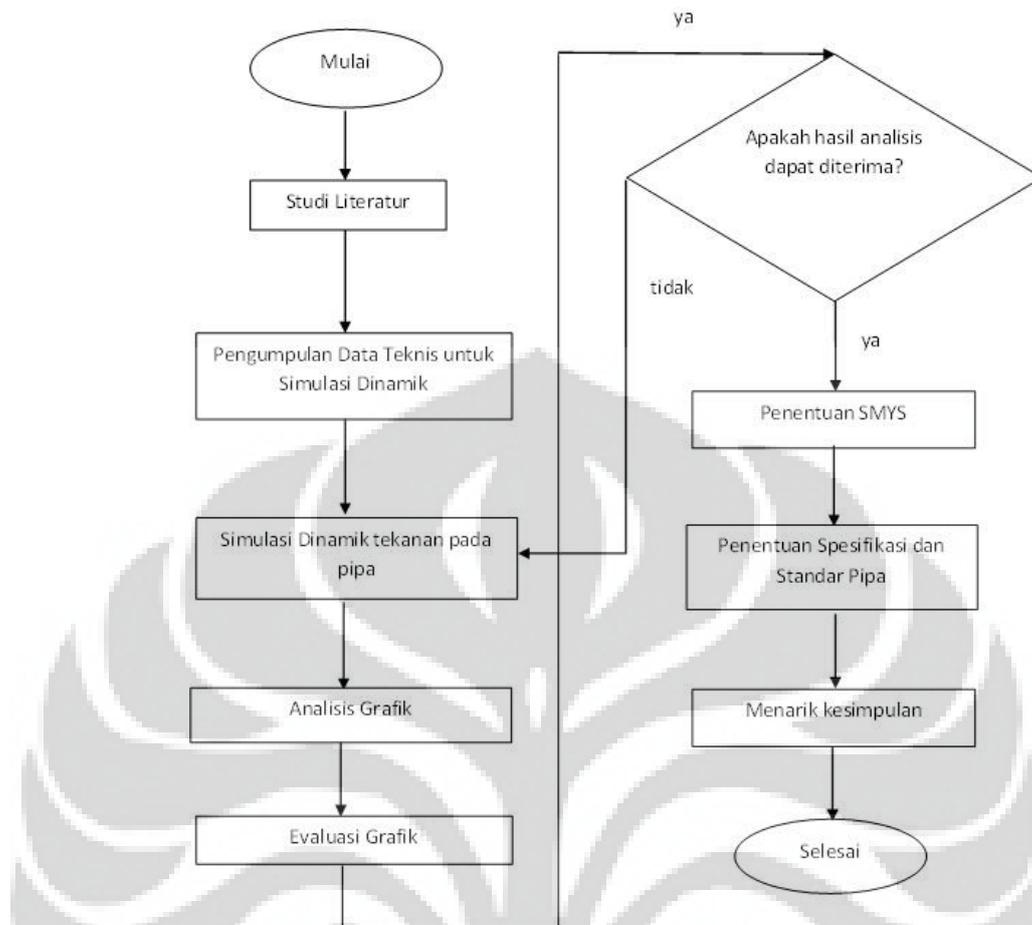
3.2 Prosedur Penelitian

3.2.1 Prosedur Penelitian Besar

Untuk mencapai tujuan penelitian ini maka dilakukan tahapan-tahapan penelitian ditunjukkan oleh Gambar 3.1, dengan penjelasan berikut ini:

1. Studi Literatur

Penelitian dibekali dengan pengetahuan dasar teori tentang proyek Blok Cepu, kompresi CO₂, perpipaan, jenis material pipa, SMYS, jenis standar pipa, serta studi simulasi dinamik menggunakan simulator.



Gambar 3.1 Diagram Alir Tahapan Penelitian Besar

2. Mengumpulkan Data Teknis

Pengumpulan data teknis dilakukan dengan mengidentifikasi komposisi, melihat *process flow diagram* (PFD), dan karakteristik aliran CO₂ serta spesifikasi unit/alat apa saja yang dibutuhkan untuk simulasi dinamik dari Laporan Studi Pembangunan Fasilitas Lapangan Jambaran-Tiung Biru Blok Cepu. Seperti yang dijelaskan pada BAB 2, penggunaan berbagai macam teknik adalah suatu keharusan karena masing-masing teknik tersebut saling melengkapi satu sama lain. Dalam penelitian ini identifikasi dilakukan dengan konsultasi dengan pihak yang mengerjakan proyek ini.

3. Simulasi Dinamik Tekanan pada Pipa CO₂

Dalam tahap ini, data teknis yang telah dikumpulkan akan di simulasi dengan menggunakan simulator. Simulasi dinamik dilakukan dengan menetapkan unit/alat yang sesuai dengan keperluan dan sesuai dengan informasi yang sudah dikumpulkan pada tahap sebelumnya. Simulasi ini juga dilakukan sesuai dengan kasus yang telah ditentukan dengan persamaan aliran gas CO₂ di sepanjang pipa transmisi (Schoeder, 2001),

$$Q = C \frac{T_b}{P_b} D^{2.5} e \left(\frac{P_1^2 - P_2^2}{LGT_a Z_{af}} \right) \quad (3.1)$$

Dimana :

C = Konstanta, 0,011493 (metrik)

D = Diameter pipa, inch

E = efisiensi pipa

f = faktor friksi Darcy-Weisbach

G = Spesifik Gravitasi Gas

L = panjang pipa (km)

P_b = *pressure base* (psia)

P₁ = tekanan inlet (psia)

P₂ = tekanan outlet (psia)

Q = laju alir (SCF/day)

T_a = suhu rata-rata (°K)

T_b = *temperature base* (°K)

Z_a = faktor kompresibilitas

Hasilnya berupa suatu grafik tekanan di sepanjang pipa dengan persamaan tekanan,

$$OP(t) = Kc E(t) + Kc/Ti fE(t) \quad (3.2)$$

Dimana $OP(t)$ adalah output tekanan yang dihasilkan di sepanjang pipa transmisi setiap waktu.

4. Analisis Grafik

Grafik tekanan yang dihasilkan tersebut selanjutnya akan dianalisa seberapa besar tekanan yang dapat dihasilkan dari simulasi dinamik. Selain itu juga akan dianalisa fenomena yang terjadi di sepanjang pipa transmisi dan seberapa besar pengaruhnya terhadap proses.

5. Evaluasi Grafik

Setelah keseluruhan proses simulasi dinamik dilakukan, maka dapat diketahui seberapa besar tekanan yang dapat dihasilkan dan rekomendasi spesifikasi pipa yang dibutuhkan. Setelah mengevaluasi grafik, jika hasil evaluasi tidak dapat diterima, maka harus dilakukan kembali tahap simulasi dinamik hingga akhirnya dapat diterima hasil evaluasi grafik tersebut, dan dilanjutkan dengan penentuan spesifikasi pipa yang digunakan.

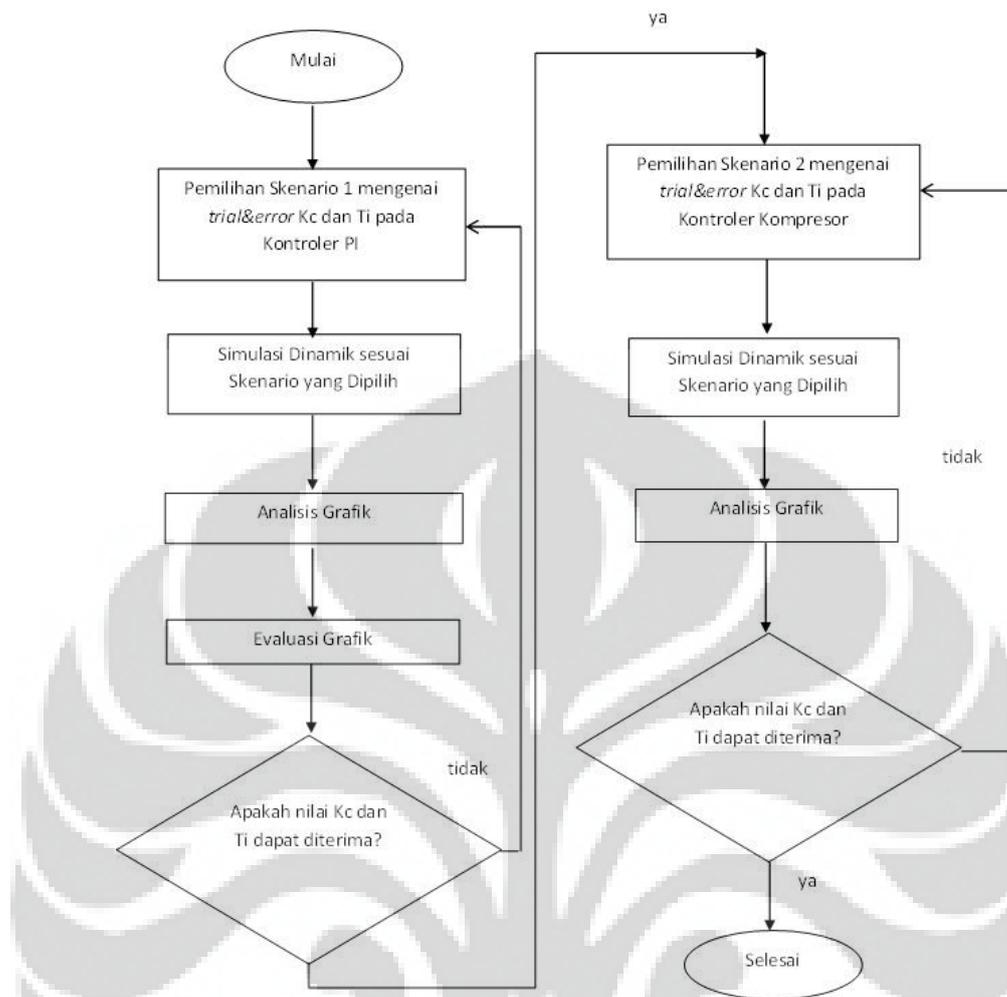
6. Penentuan Spesifikasi Pipa dan Standar Pipa

Tahap ini bertujuan untuk menentukan spesifikasi dan standar pipa yang akan digunakan. Spesifikasi ditentukan dari hasil grafik simulasi dinamik. Setelah itu akan di cocokkan dengan standar pipa resmi yang memenuhi spesifikasi pipa tersebut. Standar pipa yang dapat digunakan antara lain dari ASME atau ANSI.

7. Menarik kesimpulan dari hasil penelitian.

3.2.2 Prosedur Penelitian Rutin

Prosedur ini merupakan prosedur yang digunakan untuk kegiatan penelitian rutin, atau yang dapat dilaksanakan setiap saat. Prosedur ini dilaksanakan untuk memenuhi kegiatan penelitian besar. Gambar 3.2 berikut ini adalah diagram alir tahapan penelitian rutin beserta penjelasannya.



Gambar 3.2 Diagram Alir Tahapan Penelitian Rutin

1. Pemilihan Skenario 1 mengenai *trial&error* K_c dan T_i pada Kontroler PIC

Skenario 1 untuk simulasi dinamik ini adalah menentukan nilai K_c dan T_i dengan menggunakan metode *trial&error* pada kontroler PI karena cocok karena menggabungkan akurasi (tidak ada *offset*) dengan waktu respon yang relatif cepat. Metode *trial & error* lebih mudah digunakan karena pada skenario ini variabel terikatnya hanya tekanan saja.

Pada skenario ini dilakukan dengan menghubungkan kontroler PIC dengan masing-masing aliran IS-1, OS-1, OS-2, OS-3, dan OS-4 tanpa mengatur proses operasi kompresor yang berada di depan VLV-100 yang memberi tekanan di sepanjang segmen pipa transmisi. Nilai K_c dan T_i

ditentukan melalui studi literatur yang sudah dilaksanakan sebelumnya. Nilai K_c dan T_i yang ini akan digunakan untuk skenario 1, yaitu:

- a. Nilai K_c sebesar 0,25, 2, 3, 4 dan nilai T_i sebesar 1, 1, 2, 2 dengan letak PIC Pipa di OS-4 yang berhubungan dengan VLV-100.
- b. Hasil nilai K_c dan T_i poin a dengan letak PIC Pipa di OS-3, OS-2, OS-1 dan IS-1 yang berhubungan dengan VLV-100.
- c. Hasil nilai K_c dan T_i poin a dengan letak PIC Pipa di OS-4 yang menghubungkan masing-masing VLV-100 dan VLV-101
- d. Hasil nilai K_c dan T_i poin a dengan letak PIC Pipa di OS-4 yang menghubungkan masing-masing VLV-100, VLV-101, VLV, 102, dan VLV-103

2. Simulasi Dinamik Skenario 1

Dalam tahap ini, simulasi dilakukan sesuai dengan skenario yang telah dipilih sebelumnya. Simulasi akan menghasilkan suatu grafik tekanan di sepanjang segmen pipa transmisi pada saat waktu tertentu.

3. Analisis Grafik

Setelah simulasi dinamik dilakukan, grafik yang dihasilkan akan dianalisa besaran tekanan yang dihasilkan dan fenomena yang terjadi pada pipa transmisi. Analisa juga menjelaskan besaran kenaikan tekanan yang disesuaikan dengan SMYS yang telah diperoleh dari studi pustaka.

4. Evaluasi Grafik

Setelah keseluruhan proses simulasi dinamik dilakukan, maka dapat diketahui besaran tekanan yang dihasilkan dan spesifikasi pipa yang dibutuhkan. Jika hasil evaluasi tidak dapat diterima, maka harus dilakukan kembali tahap simulasi dinamik hingga akhirnya hasil evaluasi grafik tersebut dapat diterima. Dari evaluasi ini diperoleh nilai K_c dan T_i yang optimal dan konfigurasi kontroler sistem perpipaan yang sesuai.

5. Skenario 2 untuk Menentukan Kc dan Ti pada Kontroler Kompresor

Skenario 2 ini dilakukan dengan menggunakan skenario 1 ditambah kontroler pada kompresor yang bertujuan untuk menurunkan/mematikan kinerja kompresor saat ESDV tiba-tiba ditutup. Kegiatan ini menentukan nilai Kc dan Ti yang optimal dengan menggunakan metode Ziegler-Nichols untuk kontroler kompresor. Metode ini digunakan karena variabel yang terkait ada dua, yaitu tekanan dan daya kompresor sehingga metode ini lebih mudah digunakan dibanding metode *trial & error* yang membutuhkan waktu yang lama.

6. Analisis Grafik

Setelah simulasi dinamik dilakukan, grafik yang dihasilkan akan dianalisa besaran tekanan yang dihasilkan dan fenomena yang terjadi pada pipa transmisi. Analisa juga menjelaskan besaran kenaikan tekanan yang disesuaikan dengan SMYS yang telah diperoleh dari studi pustaka.

7. Evaluasi Grafik

Kegiatan ini ditujukan untuk mengevaluasi besaran tekanan yang dihasilkan dan spesifikasi pipa yang dibutuhkan. Jika hasil evaluasi tidak dapat diterima, maka harus dilakukan kembali tahap simulasi dinamik hingga akhirnya hasil evaluasi grafik tersebut dapat diterima.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

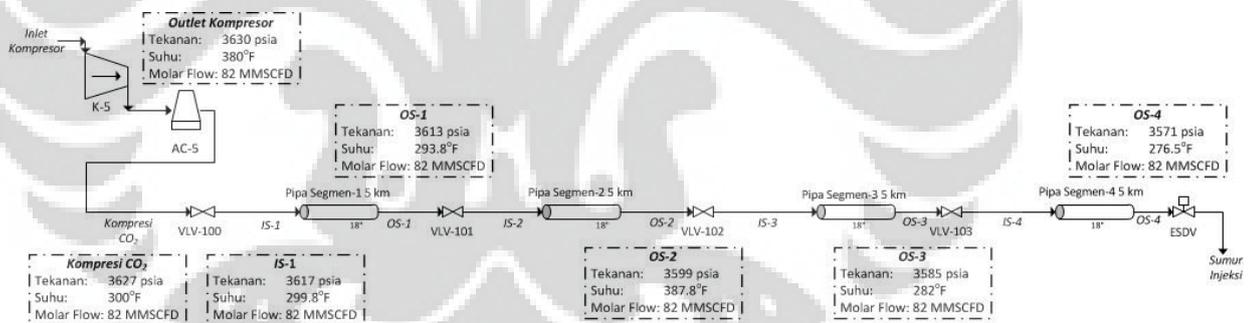
4.1 Proses Dasar

Sesuai latar belakang yang telah dijelaskan pada BAB 1, simulasi ini digunakan untuk melihat karakteristik/grafik korelasi antara tekanan dengan suatu jarak pada pipa. Penelitian dimulai dengan mengumpulkan data-data teknis yang kemudian akan dimasukkan pada simulator. Data-data teknis yang telah dikumpulkan dapat dilihat pada tabel 4.1 dan gambar 4.1.

Tabel 4.1 Data Teknis Perpipaan

Sumber: Lemtek UI, 2012

Jalur Pipa	Jarak (km)	Nominal Diameter (mm)	Diameter Dalam (mm)
<i>Cendana Production/CO₂ Injection Flowline</i>	20	450	168



Gambar 4.1 *Pipe Layout* yang digunakan untuk Simulasi Dinamik

Dalam proses simulasi dinamik, pipa ini dibagi menjadi 4 segmen dengan masing-masing jarak segmen pipa transmisi mempunyai panjang 5 km. Pembagian segmen ini bertujuan untuk mengetahui perubahan tekanan di sepanjang segmen pipa transmisi pada saat simulasi. Sebelum masuk pipa transmisi terdapat pipa *kompresi CO₂* yang berisi CO₂ superkritis. Lalu pada setiap ujung-ujung segmen pipa transmisi diletakkan *valve* untuk menjaga aliran agar sesuai dengan yang diinginkan. Pada ujung segmen 4 diletakkan suatu ESDV yang digunakan untuk menjaga operasi berjalan dengan aman. Dalam kondisi

normal, *pressure drop* yang terjadi di dalam tiap segmen pipa transmisi dan *valve* berkisar antara 2-4 psia dan 10 psia sehingga pada segmen pipa transmisi 1 memiliki tekanan sebesar 3.613 psia, segmen pipa transmisi 2 sebesar 3.599 psia, segmen pipa transmisi 3 sebesar 3.585 psia, dan segmen pipa transmisi terakhir mempunyai tekanan sekitar 3.571 psia sebelum diinjeksi ke dalam reservoir.

4.2 CO₂ Superkritis

Dari gambar 4.1 unit kompresor di awal proses yang digunakan untuk menaikkan tekanan gas CO₂ menjadi 3.627 psia (247 bar) sehingga CO₂ berada dalam fasa superkritis dengan suhu 300°F. Fase pada suhu dan tekanan tersebut di atas suhu dan tekanan kritis (T = 88°F, P = 1.085 psi). Kondisi ini mempunyai beberapa keuntungan diantaranya:

1. CO₂ superkritis lebih mudah disimpan di dalam tanah dibandingkan dengan bentuk gas (mudah terlepas ke udara) atau cairnya (CO₂ akan sulit dipindahkan)
2. Transportasi CO₂ dengan kondisi superkritis memungkinkan untuk memindahkan CO₂ lebih banyak karena mengimplikasikan daya penahanan yang lebih rendah.
3. CO₂ dapat dijaga kondisi superkritisnya meskipun terdapat perubahan tekanan ataupun suhu di sepanjang segmen pipa transmisi dengan mengontrol suhu dan tekanan sistem.

4.3 Pipa Carbon Steel

Teknologi *Carbon capture and storage* sekarang pada tahap yang sangat penting dalam perkembangannya karena sampai saat ini belum ada standar/spesifikasi yang mengatur penggunaan untuk pipa CO₂ bagi kegiatan CCS ini. Isu yang terkait dengan korosi *carbon steel* pada lingkungan CO₂ basah dan kering telah didokumentasikan dengan baik. Hal ini menyepakati bahwa CO₂ murni, kering, pada dasarnya non-korosif terhadap *carbon steel*. Penggunaan paduan tahan korosi umumnya direkomendasikan untuk lingkungan CO₂ basah.

Untuk pipa baja karbon, korosi internal merupakan risiko yang signifikan terhadap integritas pipa dalam kasus *dewatering* dari komposisi CO₂. Air yang

terdapat di dalam aliran dikombinasikan dengan tekanan parsial CO₂ yang tinggi dapat menimbulkan tingkat korosi ekstrim, terutama karena pembentukan asam karbonat. Penyebab yang paling mungkin akibat kadar air *off-spec* dianggap sebagai *carry-over* air/glikol dari tahap menengah kompresor selama kompresi dari CO₂.

Material yang dipilih harus memenuhi syarat untuk potensi kondisi suhu rendah yang mungkin terjadi selama situasi *depressurization* pipa. Pipa *Carbon-Manganese steel* dianggap layak untuk jaringan pipa dimana kadar air dari aliran CO₂ dikontrol untuk menghindari pembentukan air bebas di dalam pipa. Aplikasi *corrosion resistant alloy* (CRA) atau *CRA clad* mungkin dapat dijadikan pilihan karena cocok untuk jaringan pipa lebih pendek (Paul, Shiladitya et al, 2010). Selain itu, kemungkinan terjadinya rentang suhu yang besar pada saat operasi membuat *carbon steel* unggul dari material lainnya (rentang suhu operasi *carbon steel* -20.2°F – 842°F). Dari alasan diatas, material yang dipilih untuk pipa CO₂ bertekanan tinggi ini adalah *carbon steel* dengan *CRA clad*.

4.4 Simulasi Dinamik

Simulasi proses dengan menggunakan perangkat lunak menghasilkan kondisi operasi, kompresor, dan ukuran pipa yang akan digunakan. Untuk desain selanjutnya, yang merupakan pekerjaan dari penelitian ini, adalah menentukan penempatan *valve* dan sistem *emergency shutdown valve* (ESDV) agar bekerja dengan baik. Oleh karena itu diperlukan simulasi dinamik di sekitar sistem tersebut.

Untuk melakukan simulasi dinamik, suatu kontroler PIC digunakan pada aliran tertentu yang dihubungkan dengan VLV-100 yang terletak di ujung depan segmen 1 agar VLV-100 dapat tertutup secara otomatis, sesuai dengan parameter yang ditentukan, saat sewaktu-waktu kondisi pada aliran terjadi *back pressure* (tekanan balik). Selain itu alat digital on/off diletakkan pada *emergency shutdown valve* (ESDV) untuk mengatur buka/tutupnya *valve* ini jika suatu saat terjadi hal yang dapat mengganggu kelancaran operasi (misalnya, kenaikan tekanan atau aliran secara tiba-tiba).

Pada simulasi dinamik juga, semua *valve* yang terdapat di dalam proses harus dilakukan *sizing* terlebih dahulu. Selanjutnya pada kontroler PIC, parameter tuning, seperti Kc dan Ti, ditentukan dengan menggunakan metode *trial & error*. Lalu untuk digital on/off harus ditentukan ambang batas (*threshold*) tekanan yang menentukan buka/tutupnya ESDV saat operasi dilakukan. Setelah semua parameter sudah ditentukan, mode *steady state* harus diubah menjadi mode dinamik pada simulator serta integrator pada *radio button* off. Untuk menjalankan simulasi dinamik integrator ini harus berada di posisi on.

Beberapa simulasi yang akan dilakukan yaitu dengan skenario sebagaimana yang diurutkan di bawah ini,

a. Skenario 1

- Nilai Kc sebesar 0,25, 2, 3, 4 dan nilai Ti sebesar 1, 1, 2, 2 dengan letak PIC Pipa di OS-4 yang berhubungan dengan VLV-100.
- Nilai Kc dan Ti sebesar 4 dan 2 dengan letak PIC Pipa di OS-3, OS-2, OS-1 dan IS-1 yang berhubungan dengan VLV-100.
- Nilai Kc dan Ti sebesar 4 dan 2 dengan letak PIC Pipa di OS-4 yang menghubungkan masing-masing VLV-100 dan VLV-101
- Nilai Kc dan Ti sebesar 4 dan 2 dengan letak PIC Pipa di OS-4 yang menghubungkan masing-masing VLV-100, VLV-101, VLV, 102, dan VLV-103.

b. Skenario 2

- Nilai Kc dan Ti sebesar 4 dan 2 untuk PIC pipa di OS-4 dan Nilai Kc dan Ti sebesar 2 dan 2 untuk PIC kompresor.
- Nilai Kc dan Ti sebesar 4 dan 2 untuk PIC pipa di IS-1 dan Nilai Kc dan Ti sebesar 2 dan 2 untuk PIC kompresor.
- Nilai Kc dan Ti sebesar 4 dan 2 untuk PIC pipa di IS-1 dan Nilai Kc dan Ti sebesar 2 dan 1 untuk PIC kompresor.

Hasil dari skenario tersebut adalah besaran perubahan tekanan (ΔP) di setiap segmen pipa dan waktu yang dibutuhkan VLV-100 untuk tertutup penuh

dalam simulasi serta waktu yang dibutuhkan respon untuk mematikan kompresor K-5.

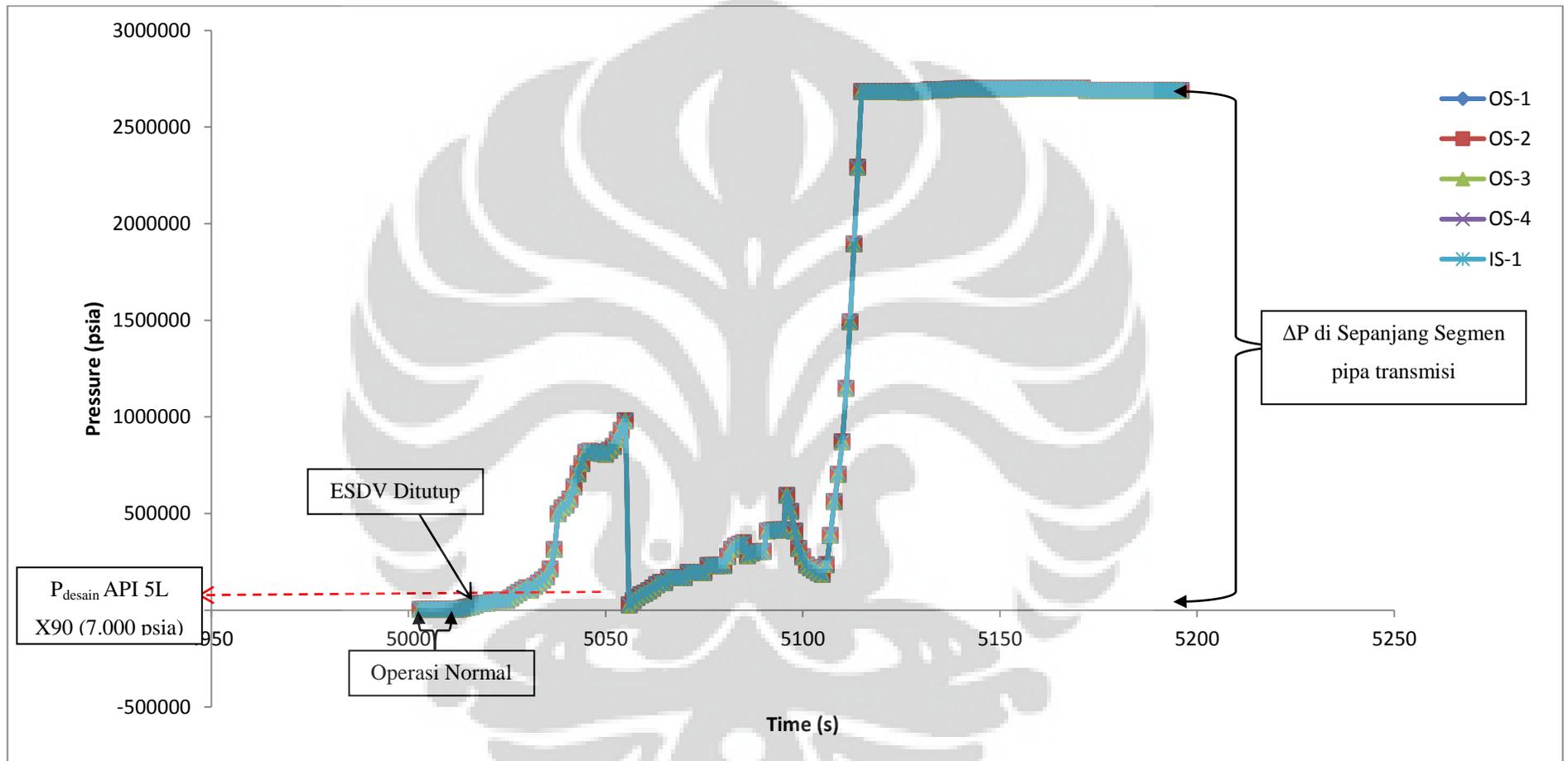
4.4.1 Desain Valve disekitar Flowline

Simulasi proses dilakukan dengan menutup tiba-tiba ESDV dengan menggunakan digital on/off. Penutupan ESDV ini dapat diakibatkan oleh kesalahan teknis atau *human error* yang terjadi di lapangan. Hal ini akan berakibat terjadinya *back pressure* menuju kompresor K-5. Untuk menjaga kompresor K-5 dari risiko *back pressure*, kontroler PIC-100 (PIC pipa) segera mengirim sinyal kepada VLV-100 untuk menutup total *valve* (Skenario 1). Dari skenario 1 ini nantinya akan diperoleh rekomendasi nilai K_c dan T_i yang untuk PIC-100. Pada skenario 2, untuk menjaga VLV-100 agar tidak pecah dari tekanan kompresor, kontroler PIC-101 (PIC kompresor) segera mengirimkan sinyal untuk kompresor K-5 untuk menurunkan daya sehingga kompresor tidak lagi memberikan tekanan pada VLV-100. Dengan begitu, VLV-100 terhindar dari kerusakan. Dari skenario 2 ini nantinya akan diperoleh rekomendasi nilai K_c dan T_i yang sesuai untuk kontroler PIC yang mematikan kompresor.

Berikut ini adalah simulasi dinamik yang dilakukan pada tekanan pipa gas CO₂.

4.4.1.1 Skenario tanpa Kontroler dan K-5 Tetap Berjalan

Pada skenario ini simulasi dilakukan dengan menutup tiba-tiba ESD *valve* lalu VLV-100 tidak ditutup dan kompresor K-5 tetap berjalan. Dari hasil simulasi diperoleh grafik yang terlihat pada gambar 4.2. Grafik yang ditunjukkan memperlihatkan adanya perubahan tekanan di sepanjang segmen pipa transmisi sangat tinggi, mencapai $2,7 \times 10^6$ psia (ΔP) dengan suhu $-283.7 - 123.7^\circ\text{F}$. Hal ini terjadi karena saat ESD *valve* ditutup terjadi *backpressure* di sepanjang segmen pipa transmisi. Selain itu, dari grafik juga terlihat adanya fluktuasi kenaikan tekanan di sepanjang segmen pipa transmisi selama selang beberapa waktu akibat kompresor K-5 yang tetap bekerja sehingga kompresor ini terus memberi tekanan di sepanjang segmen pipa transmisi, tanpa dihambat oleh VLV-100, sementara *backpressure* terus terjadi di sepanjang segmen pipa transmisi.



Gambar 4.2 Grafik Tekanan di Sepanjang Segmen Pipa Transmisi Jika Tidak Terdapat Kontroler

Universitas Indonesia

Perubahan tekanan yang sangat tinggi ini dapat mengakibatkan pipa pecah dalam tempo 5 detik meskipun memakai pipa dengan spesifikasi API 5L X90 dengan ketebalan pipa 1,25 inch yang mempunyai desain tekanan internal sebesar 7.000 psia (menggunakan persamaan 2.1).

Simulasi ini juga menunjukkan risiko yang dapat dihasilkan jika pada saat operasi berjalan terjadi kesalahan pada sistem. Sistem keamanan yang seharusnya menjaga keberlangsungan operasi, termasuk pipa dan kompresor, tidak berfungsi sehingga jika terjadi kenaikan suhu atau tekanan secara tiba-tiba, *valve* yang seharusnya menutup pipa dari tekanan kompresor tidak dapat memblok tekanan tersebut yang dapat mengakibatkan perubahan tekanan pada pipa secara drastis (jika menggunakan API 5L X90). Kompresor pun juga dapat terkena risiko ini karena *back pressure* yang terjadi dengan tekanan tinggi sehingga dapat memecahkan kompresor akibat tidak mampunya menanggung tekanan tersebut.

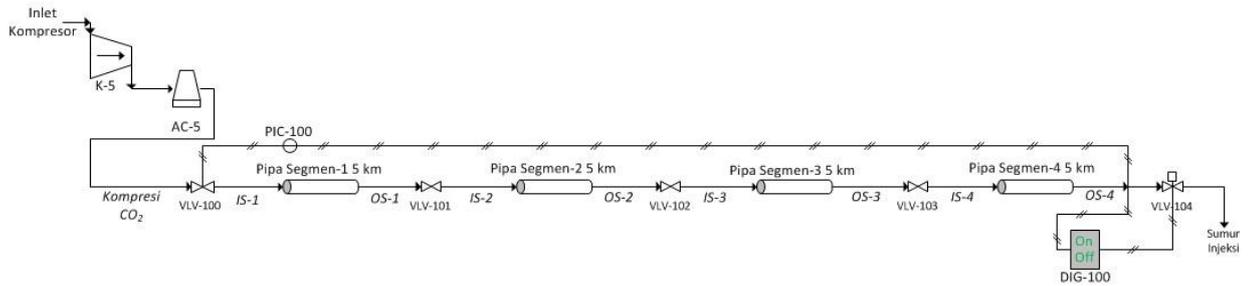
Risiko lain yang terjadi dari simulasi ini adalah adanya perubahan fasa CO₂ dari berbentuk gas menjadi cairan di sepanjang sistem perpipaan karena perubahan suhu dan tekanan CO₂ yang sangat besar.

4.4.1.2 Skenario dengan Penutupan VLV-100 dengan Variasi Kc dan Ti

Seperti yang telah dijelaskan pada BAB 2, perubahan nilai Kc dan Ti sangat mempengaruhi kontrol pada VLV-100 karena *valve* ini mampu memblok atau menghambat aliran bertekanan tinggi yang dihasilkan oleh kompresor yang masuk menuju pipa saat ESD *valve* ditutup secara tiba-tiba. Berikut ini adalah beberapa variasi nilai Kc dan Ti yang dilakukan metode penelitian skenario 1.

- a. Nilai Kc = 0.25 dan Ti = 1 pada PIC-100 di OS-4

Kontrol PIC diletakkan di ujung pipa segmen 4. Kontrol ini menghubungkan output pipa segmen-4 dengan VLV-100. Jika ESD *valve* tiba-tiba mati dan tekanan pada output pipa segmen-4 naik signifikan, kontrol PIC akan mengirimkan sinyal kepada VLV-100 untuk segera ditutup agar tidak terjadi *build-up pressure* yang terlalu tinggi di sepanjang segmen pipa transmisi. Skema proses dapat dilihat pada gambar 4.3.



Gambar 4.3 Skema Proses dengan PIC berada di OS-4

Grafik yang dihasilkan (gambar C.1 pada LAMPIRAN C) menunjukkan adanya perubahan tekanan (ΔP) signifikan yang mencapai $3,8 \times 10^6$ psia di sepanjang segmen pipa transmisi. Hal ini terjadi karena saat ESD valve ditutup secara tiba-tiba, respon kontrol PIC ke VLV-100 sangat lambat ($t = 1100$ s) sehingga penutupan valve pun sangat lambat. Ditambah dengan kompresor yang terus memberikan tekanan menuju pipa yang mengakibatkan akumulasi tekanan di sepanjang segmen pipa transmisi sangat tinggi dan menyebabkan pipa pecah meskipun memakai pipa dengan spesifikasi API 5L X90 dengan ketebalan pipa 1,25 inch (mulai pecah dalam tempo 7 detik). Dari hasil ini juga terdapat perubahan fasa CO₂ dari berbentuk gas menjadi cairan di sepanjang sistem perpipaan karena perubahan suhu dan tekanan CO₂ yang sangat besar.

b. Nilai $K_c = 2$ dan $T_i = 1$ pada PIC-100 di OS-4

Setelah dilakukan simulasi, karakteristik tekanan yang berada di sepanjang segmen pipa transmisi menunjukkan adanya perubahan tekanan (ΔP) yang mencapai $1,63 \times 10^6$ psia dengan suhu $-358.9 - 123.6^\circ\text{F}$ di sepanjang segmen pipa transmisi (gambar C.2 pada LAMPIRAN C). Hal ini terjadi karena respon kontrol PIC ke VLV-100 sudah lebih cepat sehingga penutupan valve pun cepat dibandingkan dengan simulasi a (sekitar $t = 110$ s). Namun, respon ini belum ideal karena penutupan VLV-100 belum mampu memblokir tekanan yang datang dari arah kompresor yang dapat menyebabkan pipa pecah meskipun memakai pipa dengan spesifikasi API 5L X90 dengan ketebalan pipa 1,25 inch (mulai pecah dalam tempo 9 detik). Dari hasil ini juga terdapat perubahan fasa CO₂ dari berbentuk gas

menjadi cairan di sepanjang sistem perpipaan karena perubahan suhu dan tekanan CO₂ yang sangat besar.

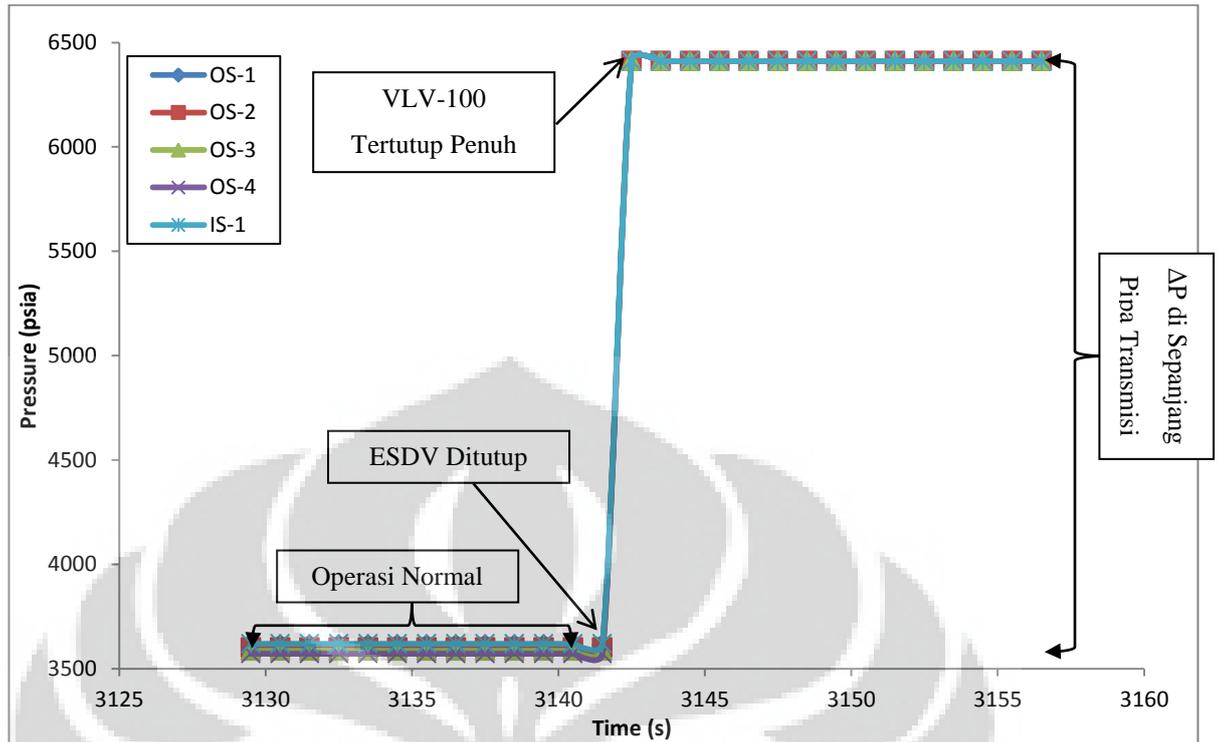
c. Nilai $K_c = 3$ dan $T_i = 2$ pada PIC-100 di OS-4

Setelah dilakukan simulasi, karakteristik tekanan yang berada di sepanjang segmen pipa transmisi menunjukkan adanya perubahan tekanan (ΔP) yang mencapai sekitar kurang lebih 85.598-86.044 psia dengan suhu $-40.47 - 80.5^\circ\text{F}$ di sepanjang segmen pipa transmisi (gambar C.3 pada LAMPIRAN C). Hal ini terjadi karena respon Kontrol PIC ke VLV-100 sudah cukup cepat sehingga penutupan *valve* pun lebih cepat dibandingkan dengan simulasi b (sekitar $t = 70$ s). Respon ini belum ideal karena penutupan VLV-100 tidak mampu memblok tekanan yang datang dari arah kompresor yang dapat menyebabkan pipa pecah meskipun memakai pipa dengan spesifikasi API 5L X90 dengan ketebalan pipa 1,25 inch (mulai pecah dalam tempo 10 detik). Dari hasil simulasi ini juga terdapat perubahan fasa CO₂ dari berbentuk gas menjadi cairan di sepanjang sistem perpipaan karena suhu dan tekanan CO₂ sudah melewati batas daerah superkritis (untuk tekanan 85.598-86.044 psia, daerah suhu superkritis $> 110^\circ\text{F}$).

d. Nilai $K_c = 4$ dan $T_i = 2$ pada PIC-100 di OS-4

Setelah dilakukan simulasi, karakteristik tekanan yang berada di sepanjang segmen pipa transmisi menunjukkan adanya perubahan tekanan (ΔP) yang mencapai kurang lebih 2.793-2.895 psia dengan suhu 299°F di sepanjang segmen pipa transmisi (gambar 4.4).

Perubahan tekanan yang tidak terlalu besar ini terjadi karena saat ESD *valve* ditutup secara tiba-tiba, respon Kontrol PIC ke VLV-100 sangat cepat untuk penutupan *valve* (sekitar $t = 1$ s) sehingga *valve* mampu memblok tekanan yang datang dari arah kompresor.

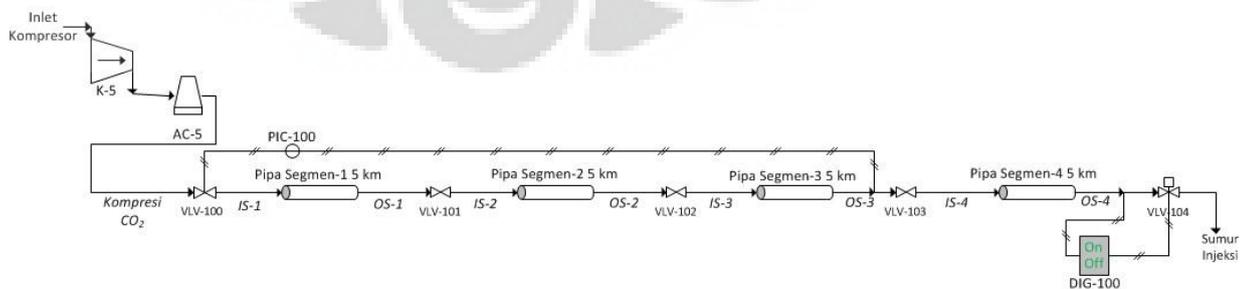


Gambar 4.4 Grafik Tekanan di Sepanjang segmen pipa transmisi dengan PIC-100 di OS-4 ($K_c = 4$ dan $T_i = 2$)

Perubahan tekanan sebesar ini juga dapat memenuhi spesifikasi pipa API 5L X90 dengan ketebalan pipa 1,25 inch. Dalam simulasi ini tidak terjadi perubahan fasa karena suhu dan tekanan masih di dalam daerah superkritis (untuk tekanan 6.410 psia, daerah suhu superkritis $> 248^\circ\text{F}$).

e. Nilai $K_c = 4$ dan $T_i = 2$ dengan PIC-100 di OS-3

Simulasi ini dilakukan dengan menghubungkan OS-3 dan persentase bukaan VLV-100 melalui kontrol PIC (gambar 4.5).



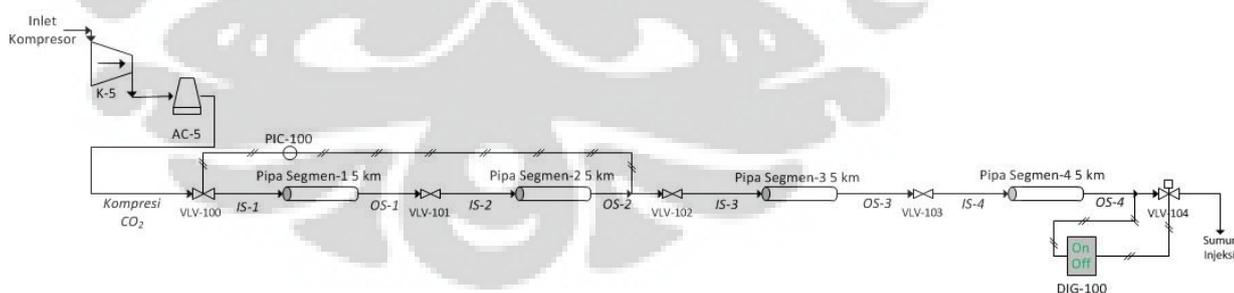
Gambar 4.5 Skema Proses dengan PIC pada OS-3

Setelah dilakukan simulasi, karakteristik tekanan yang berada di sepanjang segmen pipa transmisi menunjukkan adanya perubahan tekanan (ΔP) yang mencapai kurang lebih 1.376-1.422 psia dengan suhu 299°F di sepanjang segmen pipa transmisi (lihat gambar C.4 pada LAMPIRAN C).

Perubahan tekanan yang tidak terlalu besar ini terjadi karena saat ESD *valve* ditutup secara tiba-tiba, respon Kontrol PIC ke VLV-100 sangat cepat untuk penutupan *valve* (sekitar $t = 1$ s) sehingga *valve* mampu memblok tekanan yang datang dari arah kompresor. Perubahan tekanan sebesar ini juga dapat memenuhi spesifikasi pipa API 5L X70 dengan ketebalan pipa 1,25 inch yang memiliki desain tekanan internal 5.430 psia. Dalam simulasi ini tidak terjadi perubahan fasa karena suhu dan tekanan masih di dalam daerah superkritik (untuk tekanan 4.993 psia, daerah suhu superkritik $> 248^\circ\text{F}$).

f. Nilai $K_c = 4$ dan $T_i = 2$ dengan Kontrol PIC di OS-2

Simulasi ini dilakukan dengan menghubungkan OS-2 dan persentase bukaan VLV-100 melalui kontrol PIC (lihat gambar 4.6). Setelah dilakukan simulasi, karakteristik tekanan yang berada di sepanjang segmen pipa transmisi menunjukkan adanya perubahan tekanan (ΔP) yang mencapai kurang lebih 1.376-1.422 psia dengan suhu 299°F di sepanjang segmen pipa transmisi (lihat gambar C.5 pada LAMPIRAN C).



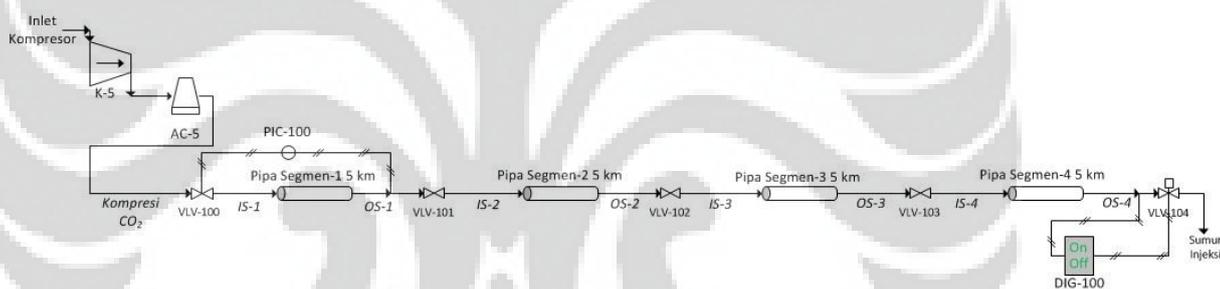
Gambar 4.6 Skema Proses dengan PIC pada OS-2

Perubahan tekanan yang tidak terlalu besar ini terjadi karena saat ESD *valve* ditutup secara tiba-tiba, respon Kontrol PIC ke VLV-100 sangat cepat untuk penutupan *valve* (sekitar $t = 1$ s) sehingga *valve* mampu memblok tekanan yang datang dari arah kompresor. Perubahan tekanan

sebesar ini juga dapat memenuhi spesifikasi pipa API 5L X70 dengan ketebalan pipa 1,25 inch yang memiliki desain tekanan internal 5.430 psia. Dalam simulasi ini tidak terjadi perubahan fasa karena suhu dan tekanan masih di dalam daerah superkritis (untuk tekanan 4.993 psia, daerah suhu superkritis $> 248^{\circ}\text{F}$).

g. Nilai $K_c = 4$ dan $T_i = 2$ dengan PIC-100 di OS-1

Simulasi ini dilakukan dengan menghubungkan output pipa segmen-1 dan VLV-100 melalui kontrol PIC yang diperlihatkan pada gambar 4.7. Setelah dilakukan simulasi, karakteristik tekanan yang berada di sepanjang segmen pipa transmisi yang dihasilkan menunjukkan adanya perubahan tekanan yang mencapai kurang lebih 1.376-1.422 psia dengan suhu 299°F di sepanjang segmen pipa transmisi (lihat gambar C.6 pada LAMPIRAN C).

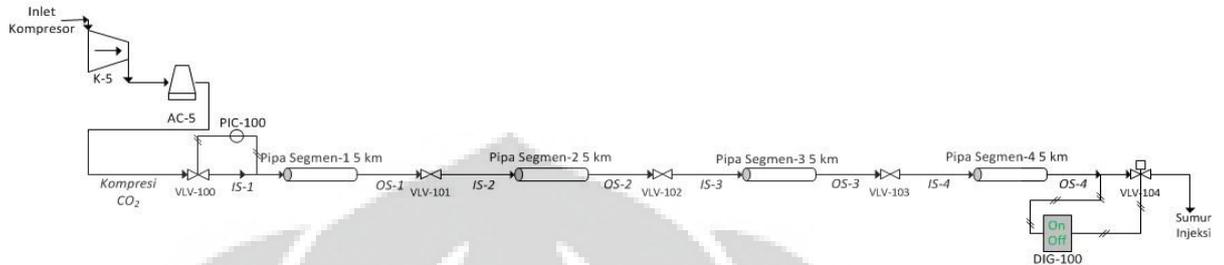


Gambar 4.7 Skema Proses dengan PIC pada OS-1

Perubahan tekanan yang tidak terlalu besar ini terjadi karena saat ESD *valve* ditutup secara tiba-tiba, respon Kontrol PIC ke VLV-100 sangat cepat untuk penutupan *valve* (sekitar $t = 1$ s) sehingga *valve* mampu memblok tekanan yang datang dari arah kompresor. Perubahan tekanan sebesar ini juga dapat memenuhi spesifikasi pipa API 5L X70 dengan ketebalan pipa 1,25 inch yang memiliki desain tekanan internal 5.430 psia. Dalam simulasi ini tidak terjadi perubahan fasa karena suhu dan tekanan masih di dalam daerah superkritis (untuk tekanan 4.993 psia, daerah suhu superkritis $> 248^{\circ}\text{F}$).

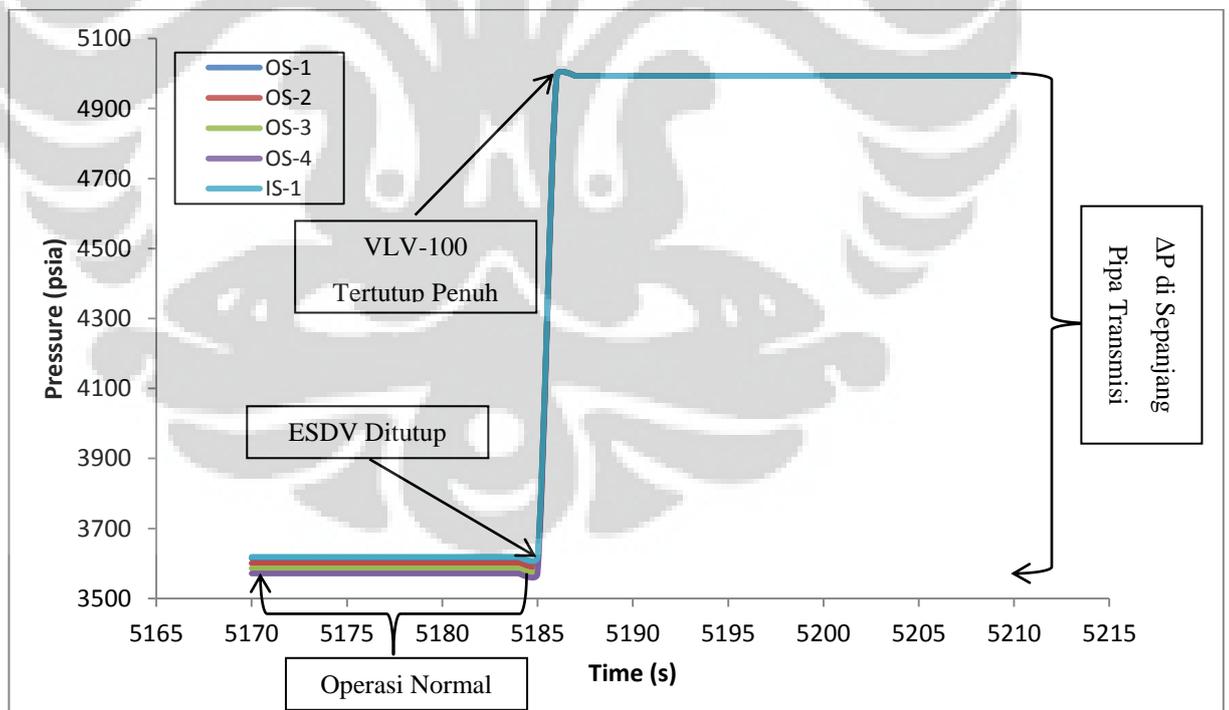
h. Nilai $K_c = 4$ dan $T_i = 2$ dengan Kontrol PIC di IS-1

Simulasi ini dilakukan dengan menghubungkan aliran IS-1 dan VLV-100 melalui kontrol PIC yang diperlihatkan pada gambar 4.8.



Gambar 4.8 Skema Proses dengan PIC pada IS-1

Setelah dilakukan simulasi, karakteristik tekanan yang berada di sepanjang segmen pipa transmisi menunjukkan adanya perubahan tekanan (ΔP) yang mencapai sekitar 1.376-1.422 psia dengan suhu 299°F di sepanjang segmen pipa transmisi (lihat gambar 4.9).



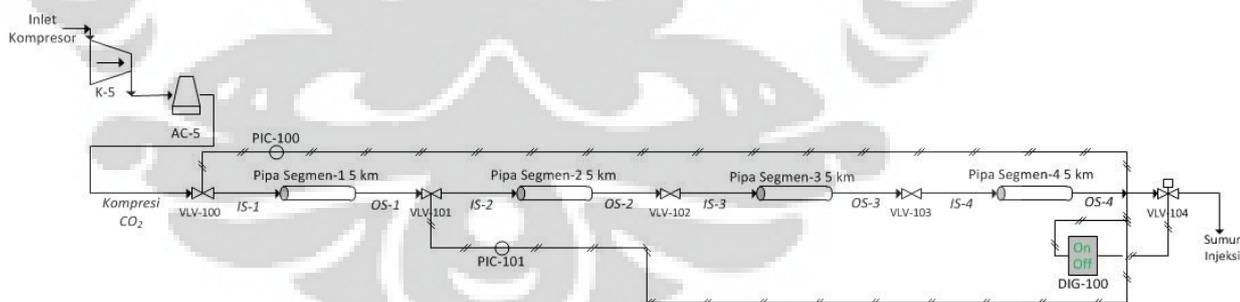
Gambar 4.9 Grafik Tekanan di Sepanjang Segmen Pipa Transmisi dengan PIC pada IS-1 ($K_c = 4$ dan $T_i = 2$)

Perubahan tekanan yang tidak terlalu besar ini terjadi karena saat ESD *valve* ditutup secara tiba-tiba, respon Kontrol PIC ke VLV-100 sangat cepat untuk penutupan *valve* (sekitar $t = 1$ s) sehingga *valve* mampu memblok tekanan yang datang dari arah kompresor.

Perubahan tekanan sebesar ini juga dapat memenuhi spesifikasi pipa API 5L X70 dengan ketebalan pipa 1,25 inch yang memiliki desain tekanan internal 5.430 psia. Dalam simulasi ini tidak terjadi perubahan fasa karena suhu dan tekanan masih di dalam daerah superkritis (untuk tekanan 4.993 psia, daerah suhu superkritis $> 248^{\circ}\text{F}$).

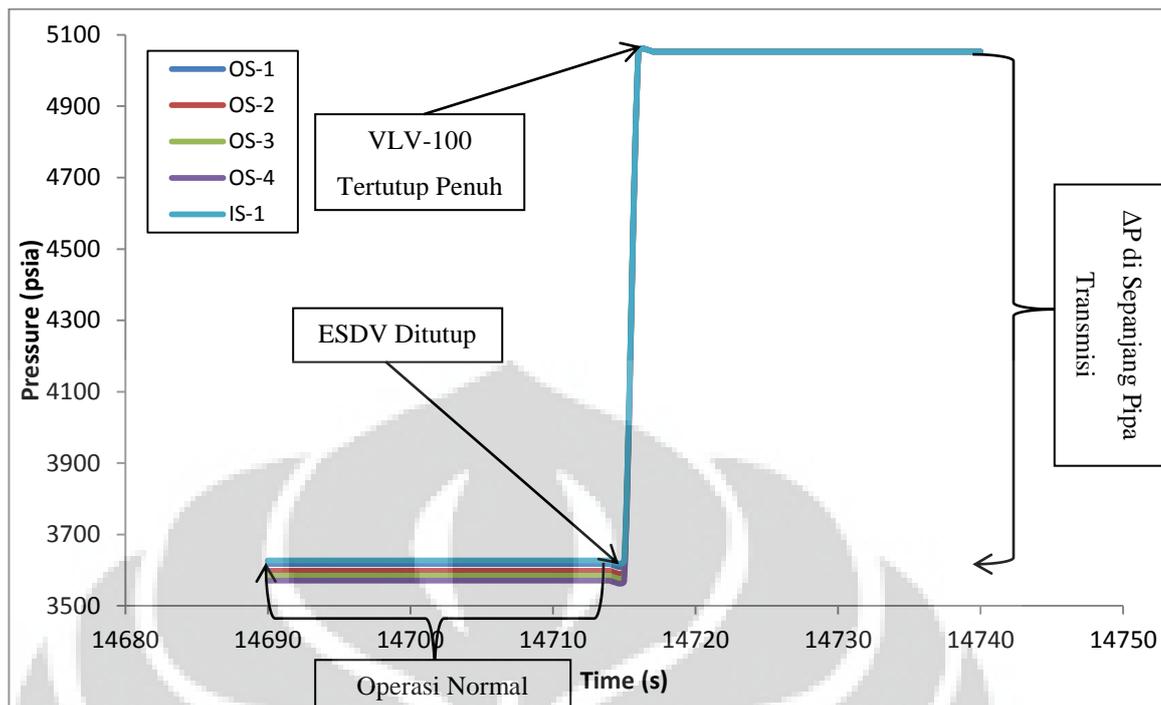
i. PIC pada OS-4 yang berhubungan dengan VLV-100 dan VLV-101

Pada kasus ini terdapat 2 PIC, yang pertama (PIC-100) menghubungkan OS-4 dengan VLV-100 dan yang kedua (PIC-101) menghubungkan aliran OS-4 dengan VLV-101. Kedua PIC ini dimaksudkan agar jika ESDV tiba-tiba mati dan tekanan pada OS-4 naik signifikan, PIC akan mengirimkan sinyal kepada VLV-100 dan VLV-101 untuk segera ditutup agar tidak terjadi *build-up pressure* yang terlalu tinggi di sepanjang segmen pipa transmisi, khususnya pada segmen pipa transmisi 1 yang terletak di depan kompresor. Nilai K_c dan T_i yang digunakan adalah 4 dan 2. Untuk melihat PFD sistem perpipaan dapat dilihat pada gambar 4.10.



Gambar 4.10 Skema Proses dengan 2 PIC pada OS-4 dengan VLV-100 dan VLV-101

Setelah dilakukan simulasi, karakteristik tekanan yang berada di sepanjang segmen pipa transmisi menunjukkan adanya perubahan tekanan yang mencapai kurang lebih 1.408-1.444 psia dengan suhu 299°F di sepanjang segmen pipa transmisi (lihat gambar 4.11).



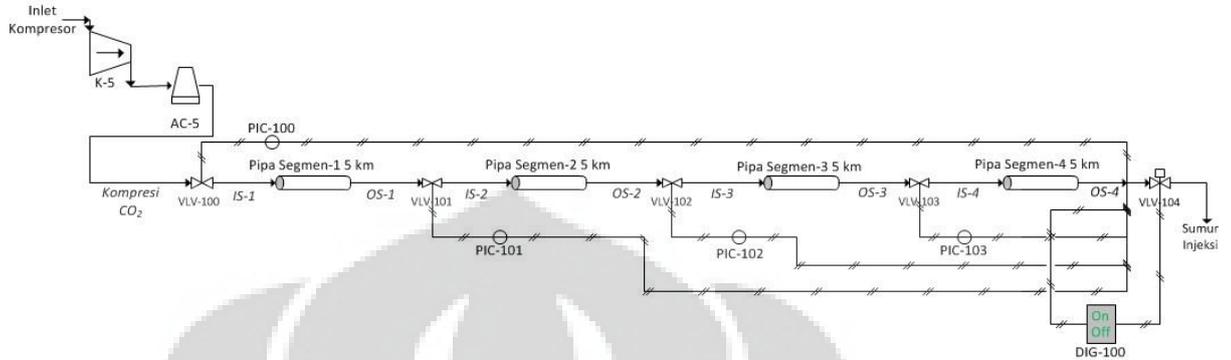
Gambar 4.11 Grafik Tekanan di Sepanjang segmen pipa transmisi dengan 2 PIC pada OS-4 ($K_c = 4$, $T_i = 2$)

Jika dibandingkan dengan simulasi dengan PIC hanya menghubungkan aliran OS-4 dengan VLV-100, perubahan tekanan yang dihasilkan sedikit lebih tinggi. Hal ini mungkin diakibatkan oleh penutupan *valve* yang kurang cepat dibandingkan dengan simulasi sebelumnya. Perubahan tekanan sebesar ini dapat memenuhi spesifikasi pipa API 5L X70 dengan ketebalan pipa 1,25 inch yang memiliki desain tekanan internal 5.430 psia. Dalam simulasi ini tidak terjadi perubahan fasa karena suhu dan tekanan masih di dalam daerah superkritis (untuk tekanan 5.025 psia, daerah suhu superkritis $> 248^\circ\text{F}$).

- j. PIC pada OS-4 yang menghubungkan VLV-100, VLV-101, VLV-102, dan VLV-103

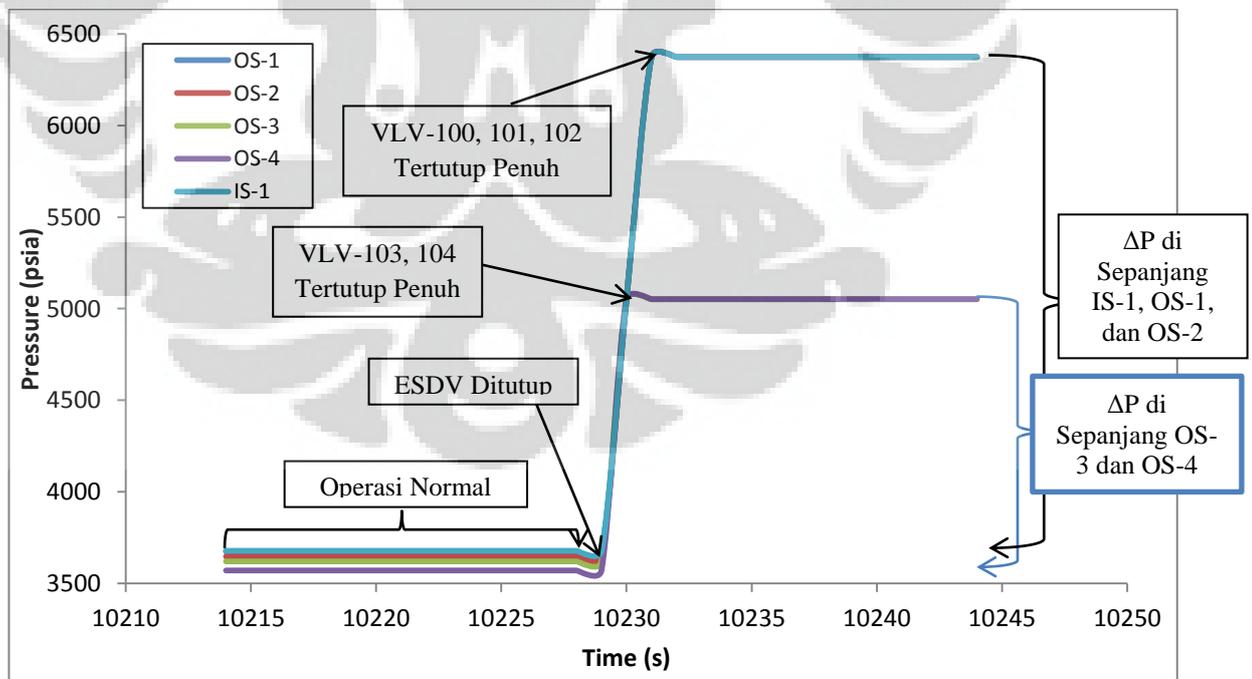
Pada kasus ini terdapat 4 PIC yang menghubungkan aliran OS-4 dengan VLV-100, VLV-101, VLV-102, dan VLV-103. Keempat PIC ini dimaksudkan agar jika ESDV tiba-tiba mati dan tekanan pada OS-4 naik signifikan, PIC akan mengirimkan sinyal kepada keempat *valve* ini untuk

segera ditutup agar tidak terjadi *build-up pressure* yang terlalu tinggi di masing-masing segmen pipa transmisi. Nilai K_c dan T_i yang digunakan adalah 4 dan 2.



Gambar 4.12 Skema Proses dengan 4 PIC pada OS-4

Setelah dilakukan simulasi, karakteristik tekanan yang berada di sepanjang segmen pipa transmisi menunjukkan adanya perubahan tekanan yang mencapai sekitar 1.440-1.479 psia pada aliran OS-3 dan OS-4, dan 2.756-2.774 psia pada aliran IS-1, OS-1 dan OS-2 dengan suhu 299°F (lihat gambar 4.13).



Gambar 4.13 Grafik Tekanan di Sepanjang segmen pipa transmisi dengan 4 PIC pada OS-4 ($K_c = 4$, $T_i = 2$)

Perubahan tekanan ini terjadi karena saat ESDV ditutup secara tiba-tiba, respon PIC ke VLV-100, VLV-101, dan VLV-102 sangat cepat dengan $t = 2$ s serta VLV-103 dan VLV-104 dengan $t = 1$ s, sehingga penutupan *valve* pun sudah cukup cepat. Respon ini sudah cukup ideal untuk penutupan keempat *valve* ini karena mampu memblok tekanan yang datang dari arah kompresor.

Aliran IS-1, OS-1, dan OS-2 mempunyai peningkatan tekanan yang lebih besar daripada aliran OS-3 dan OS-4 karena aliran IS-1, OS-1, dan OS-2 terletak lebih dekat dengan kompresor K-5. Pada saat ESDV tiba-tiba ditutup, *backpressure* yang terjadi bertemu secara signifikan dengan aliran bertekanan yang datang dari kompresor K-5 sesaat sebelum VLV-100, 101, dan 102 ditutup. Selain itu laju alir yang cukup besar (82 MMSCFD) juga turut mempengaruhi kenaikan tekanan yang besar di sepanjang segmen pipa transmisi.

Jika dibandingkan dengan simulasi dengan PIC hanya menghubungkan aliran OS-4 dengan VLV-100, peningkatan tekanan yang dihasilkan sedikit lebih tinggi. Hal ini mungkin diakibatkan oleh penutupan *valve* yang kurang cepat dan adanya sinyal yang bentrok jika dibandingkan dengan simulasi sebelumnya. Perubahan tekanan dalam simulasi ini dapat memenuhi spesifikasi pipa API 5L X90 dengan ketebalan pipa 1,25 inch. Dalam simulasi ini aliran CO₂ tidak berubah fase menjadi cairan karena suhu dan tekanan masih di dalam daerah superkritis (untuk tekanan 5.050-6.373 psia, daerah suhu superkritis > 248°F).

Secara keseluruhan, hasil skenario 1 dapat dilihat pada tabel 4.2 dibawah ini.

Tabel 4.2 Hasil Simulasi Skenario 1 (P pada Kompresi CO_2 = 3.627 psia, P pada IS-1 = 3.617 psia, P pada OS-1= 3.613 psia, P pada OS-2= 3.599 psia, P pada OS-3= 3.585 psia, P pada OS-4 = 3.571 psia)

No	Kc	Ti	Letak PIC	ΔP pada Aliran setelah ESDV Ditutup (psia)						t untuk VLV-100 (s)*	Rujukan
				Kompresi CO_2	IS-1	OS-1	OS-2	OS-3	OS-4		
1			Tidak ada	$2,7 \times 10^6$	$2,7 \times 10^6$	$2,7 \times 10^6$	$2,7 \times 10^6$	$2,7 \times 10^6$	$2,7 \times 10^6$		Gambar 4.1 dan 4.2
2	0,25	1	OS-4 dengan VLV-100	$4,1 \times 10^6$	$3,8 \times 10^6$	$3,8 \times 10^6$	$3,8 \times 10^6$	$3,8 \times 10^6$	$3,8 \times 10^6$	1000	Gambar 4.3 dan Gambar C.1 LAMPIRAN C
3	2	1	OS-4 dengan VLV-100	$2,2 \times 10^6$	$1,63 \times 10^6$	$1,63 \times 10^6$	$1,63 \times 10^6$	$1,63 \times 10^6$	$1,63 \times 10^6$	110	Gambar 4.3 dan Gambar C.2 LAMPIRAN C
4	3	2	OS-4 dengan VLV-100	$1,03 \times 10^6$	85.598	86.002	86.016	86.030	86.044	70	Gambar 4.3 dan Gambar C.3 LAMPIRAN C
5	4	2	OS-4 dengan VLV-100	$1,1 \times 10^6$	2.793	2.797	2.811	2.825	2.839	1	Gambar 4.3 dan Gambar 4.4
6	4	2	OS-3 dengan VLV-100	$9,5 \times 10^5$	1.376	1.380	1.394	1.408	1.422	1	Gambar 4.5 dan Gambar C.4 LAMPIRAN C
7	4	2	OS-2 dengan VLV-100	$1,33 \times 10^6$	1.376	1.380	1.394	1.408	1.422	1	Gambar 4.6 dan Gambar C.5 LAMPIRAN C
8	4	2	OS-1 dengan VLV-100	$1,28 \times 10^6$	1.376	1.380	1.394	1.408	1.422	1	Gambar 4.7 dan Gambar C.6 LAMPIRAN C
9	4	2	IS-1 dengan VLV-100	$1,2 \times 10^6$	1.376	1.380	1.394	1.408	1.422	1	Gambar 4.8 dan Gambar 4.9
10	4	2	OS-4 dengan VLV-100 dan VLV-101	$1,1 \times 10^6$	1.408	1.412	1.426	1.440	1.444	1	Gambar 4.10 dan Gambar 4.11
11	4	2	OS-4 dengan VLV-100 VLV-101, 102, 103	1×10^6	2.756	2.760	2.774	1.440	1.479	2	Gambar 4.12 dan Gambar 4.13

Keterangan:

* t adalah waktu yang dibutuhkan respon untuk menutup penuh VLV-100

4.4.1.3 Rekomendasi Kc dan Ti Optimal dari Simulasi 1

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan diatas, rekomendasi nilai Kc dan Ti yang dapat digunakan secara optimal adalah nilai Kc sebesar 4 dan Ti sebesar 2. Nilai Kc dan Ti ini mampu mengontrol VLV-100 agar dapat menutup dengan sangat cepat sehingga *valve* ini mampu memblok tekanan yang terus datang dari kompresor K-5 yang tetap bekerja dan menjaga suhu tetap berada di daerah superkritis.

Sementara itu konfigurasi yang optimal untuk kasus ini adalah dengan menempatkan PIC yang menghubungkan aliran IS-1 dengan VLV-100 karena perubahan tekanan di sepanjang segmen pipa transmisi juga dapat dijaga agar tidak naik secara signifikan. Penempatan PIC pada aliran IS-1 juga dapat memudahkan pemasangan instrumentasi dan sinyal karena letaknya yang berdekatan dengan *gas processing facility* (GPF) sehingga dapat menghemat biaya kebutuhan sinyal.

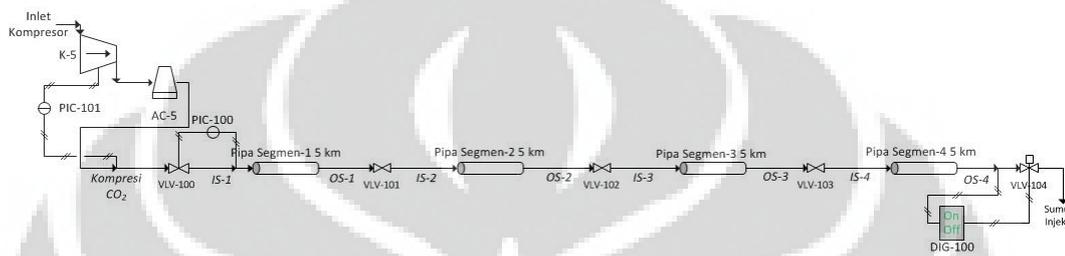
Kelemahan skenario ini adalah saat ESD *valve* ditutup lalu VLV-100 tertutup secara otomatis, kompresor K-5 terus bekerja sehingga akan berdampak langsung kepada VLV-100 (P masuk ke *valve* hingga $2,7 \times 10^6$ psia) sehingga *valve* akan pecah. Oleh karena itu kompresor harus diberhentikan dengan kontrol PIC yang berhubungan dengan *speed* atau *power* yang digunakan oleh kompresor. Dengan begitu, VLV-100 tidak akan pecah dan kegiatan ini dapat mencegah dampak bahaya yang dapat terjadi.

4.4.2 Sistem Kontrol yang Saling Berhubungan diantara VLV-100 dan Kompresor K-5

Simulasi dilakukan dengan menambahkan kontroler PIC yang berguna untuk mematikan kompresor pada saat tekanan di sepanjang segmen pipa transmisi naik secara signifikan. Kegiatan ini bermanfaat untuk menjaga VLV-100 agar tidak pecah akibat terus menerus diberi tekanan oleh kompresor K-5 ($Q = 701$ hp). Pada simulasi ini akan dilakukan penentuan nilai Kc dan Ti untuk kontroler PIC kompresor dengan metode Ziegler-Nichols. Berikut hasil simulasi dinamik dengan menambahkan kontroler PIC pada kompresor.

a. Simulasi 1 dengan PIC-100 pada IS-1

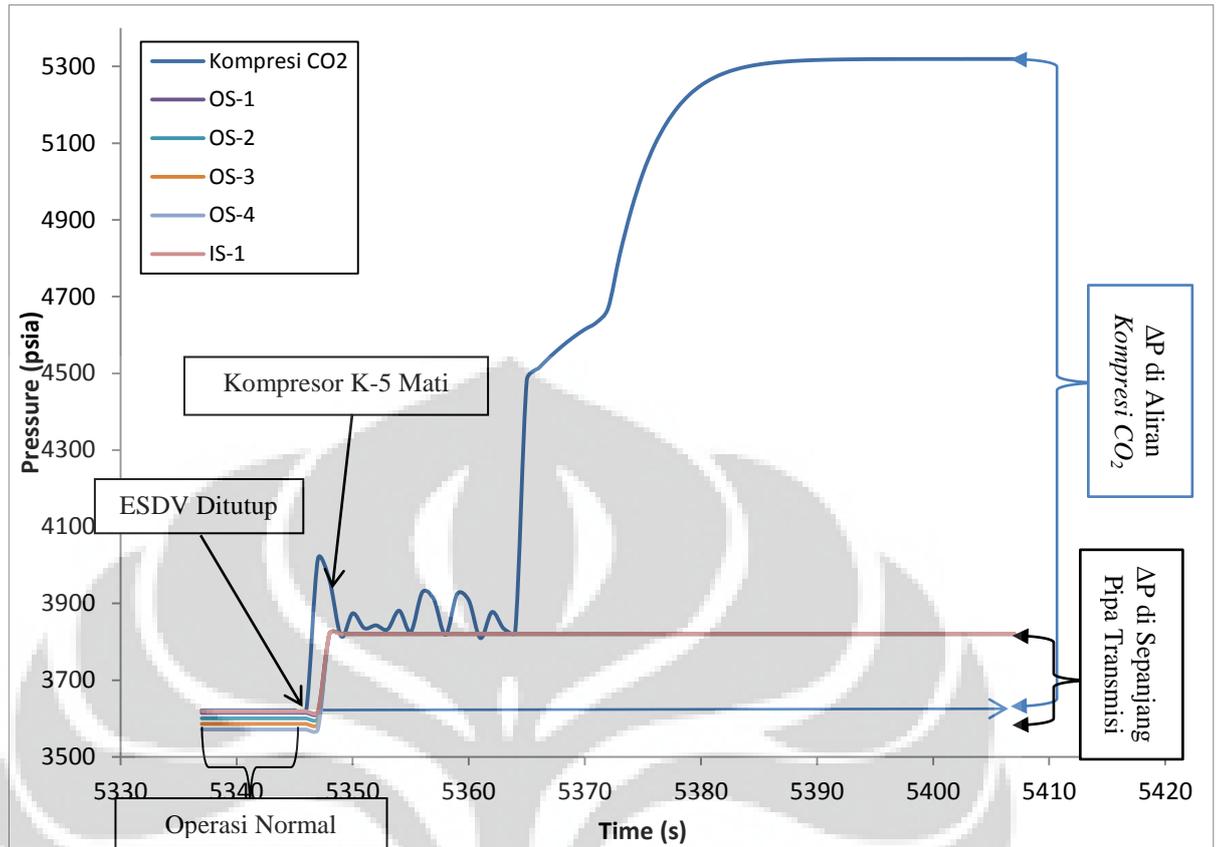
Pada kasus ini terdapat 2 PIC, PIC-100 menghubungkan aliran IS-1 dengan VLV-100, PIC-101 menghubungkan aliran *Kompresi CO₂* dengan Q5 (Daya K-5). PIC-100 yang digunakan merupakan hasil dari skenario 1, sementara PIC-101 dimaksudkan agar saat VLV-100 ditutup, kompresor berhenti bekerja agar tidak terus menekan. Untuk melihat PFD sistem perpipaan dapat dilihat pada gambar 4.14.



Gambar 4.14 Skema Proses dengan PIC-100 pada IS-1 dan PIC-101 pada Daya Kompresor

Simulasi dilakukan sesuai dengan metode Ziegler-Nichols dan dihasilkan nilai $K_{cu} = 6$ dan $T_u = 6$ dan dari Tabel 2.10 dapat diperoleh nilai $K_c = 2,7$ dan nilai $T_i = 5$. Dengan nilai tersebut, karakteristik tekanan yang berada di sepanjang segmen pipa transmisi ditunjukkan gambar 4.15. Grafik menunjukkan adanya perubahan tekanan yang mencapai sekitar 203-249 psia di sepanjang segmen pipa transmisi dan pada aliran *Kompresi CO₂* (setelah kompresor) mencapai 1.629 psia. Perubahan tekanan yang tidak besar ini terjadi karena saat ESDV ditutup secara tiba-tiba, respon PIC ke VLV-100 sangat cepat (sekitar $t = 1$ s) sehingga *valve* ini karena mampu memblok tekanan yang datang dari arah kompresor.

Pada aliran *Kompresi CO₂* terlihat tekanan sempat naik hingga 5.319 psia. Hal ini mungkin disebabkan oleh penyesuaian daya kompresor terhadap kontroler. Respon PIC ke Q5 juga sudah cukup ideal karena kompresor secara otomatis mati dalam waktu 1 detik sehingga kompresor tidak terus memberikan tekanan kepada VLV-100.

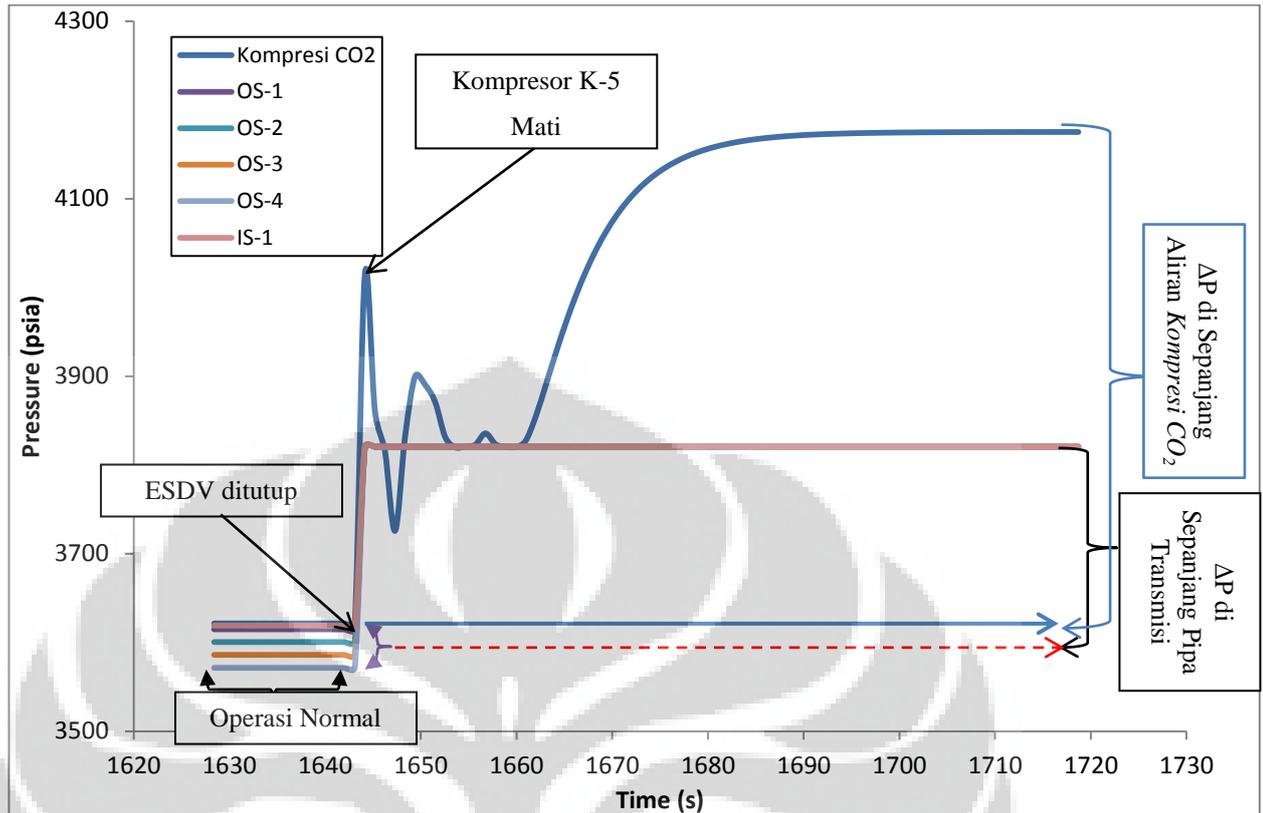


Gambar 4.15 Grafik Tekanan di Sepanjang Pipa Transmisi dengan PIC-100 pada IS-1 ($K_c = 4$, $T_i = 2$) dan PIC-101 pada Daya (Q) Kompresor K-5 ($K_c = 2,7$, $T_i = 5$)

Dengan hasil ini pun spesifikasi pipa dapat menggunakan API 5L X70 dengan ketebalan pipa sebesar 1,25 inch. Dalam simulasi ini, aliran CO_2 tidak berubah fasa karena suhu dan tekanan masih di dalam daerah superkritis (untuk tekanan 3.821-5.319 psia, daerah suhu superkritis $> 248^\circ\text{F}$).

b. Simulasi 2 dengan PIC-100 di IS-1

Simulasi ini mirip dengan simulasi 1 skenario 2, tetapi dicari respon yang lebih baik untuk kontroler kompresor. Simulasi dilakukan sesuai dengan metode Ziegler-Nichols dan diperoleh nilai $K_{cu} = 5$ dan $T_u = 3$ sehingga dari Tabel 2.10 dapat diperoleh nilai $K_c = 2,3$ dan nilai $T_i = 2,5$. Dengan nilai K_c dan T_i ini, karakteristik tekanan yang berada di sepanjang segmen pipa transmisi ditunjukkan gambar 4.16.



Gambar 4.16 Grafik Tekanan di Segmen Pipa Transmisi dengan PIC-100 pada IS-1 ($K_c = 4$, $T_i = 2$) dan PIC-101 pada Daya Kompresor K-5 ($K_c = 2,3$, $T_i = 2,5$)

Grafik yang dihasilkan menunjukkan adanya perubahan tekanan yang mencapai sekitar 204-250 psia dengan suhu 299°F di sepanjang segmen pipa transmisi. Sementara itu perubahan tekanan pada aliran *kompresi CO₂* (setelah kompresor) mencapai 548 psia dengan suhu 250 - 299°F.

Perubahan tekanan di sepanjang segmen pipa transmisi transmisi (setelah kompresor) ini terjadi karena saat ESDV ditutup secara tiba-tiba, respon PIC ke VLV-100 sangat cepat (sekitar $t = 1$ s) sehingga penutupan *valve* pun cepat. Respon ini sudah cukup ideal untuk *valve* ini karena mampu memblok tekanan yang datang dari arah kompresor sehingga tekanan di sepanjang segmen pipa transmisi tidak terus naik secara signifikan.

Secara keseluruhan, hasil simulasi dari skenario 2 dapat dilihat dari tabel 4.3 dibawah ini.

Tabel 4.3 Hasil Simulasi Skenario 1 (P pada *Kompresi CO₂* = 3.627 psia, P pada IS-1 = 3.617 psia, P pada OS-1= 3.613 psia, P pada OS-2= 3.599 psia, P pada OS-3= 3.585 psia, P pada OS-4 = 3.571 psia)

No	Letak PIC	PIC Pipa		PIC Kompresor		ΔP pada Aliran setelah ESDV Ditutup (psia)						t untuk VLV-100 (s)*	t untuk K-5 (s)**	Rujukan
		Kc	Ti	Kc	Ti	Kompresi CO ₂	IS-1	OS-1	OS-2	OS-3	OS-4			
1	IS-1, K-5	4	2	2,7	5	1.629	203	207	221	235	249	1	2	Gambar 4.14 dan Gambar 4.15
2	IS-1, K-5	4	2	2,3	2,5	548	204	208	222	236	250	1	1	Gambar 4.14 dan Gambar 4.16

Keterangan:

* t tersebut adalah waktu yang dibutuhkan respon untuk menutup penuh VLV-100

** t tersebut adalah waktu yang dibutuhkan respon untuk menurunkan daya kompresor K-5 hingga 0 hp

4.3.2.1 Rekomendasi Nilai Kc dan Ti untuk Skenario 2

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan diatas, rekomendasi nilai Kc dan Ti yang dapat digunakan secara optimal untuk PIC-101 (yang berhubungan dengan daya kompresor K-5) adalah nilai Kc sebesar 2,3 dan Ti sebesar 2,5. Respon dari nilai Kc dan Ti ini mampu mematikan kompresor dengan cepat sehingga kompresor tidak terus memberi tekanan pada VLV-100 saat *valve* ini tertutup akibat respon dari PIC-100. Respon ini juga mengakibatkan perubahan tekanan tidak terlalu drastis dalam aliran sebelum masuk pipa transmisi. Selain itu dengan rekomendasi ini aliran gas CO₂ dapat dipertahankan kondisi superkritisnya karena perubahan tekanan dan suhu di sepanjang pipa transmisi masih berada di dalam daerah superkritis.

4.4.3 Konfigurasi Optimal untuk Pipa Transmisi Gas CO₂

Dari hasil simulasi skenario 1 dan 2 diperoleh konfigurasi yang optimal untuk perpipaan adalah dengan menempatkan PIC-100 pada IS-1 dengan nilai Kc dan Ti sebesar 4 dan 2 serta PIC-101 pada kompresor dengan nilai Kc dan Ti sebesar 2,3 dan 2,5, karena mempunyai ΔP yang paling kecil dan penempatan kontroler yang masih dekat dengan GPF. Konfigurasi ini mampu menahan tekanan dengan ΔP sebesar 204-250 psia untuk pipa segmen 1 hingga 4, dan 548 psia untuk pipa kompresi CO₂, jika suatu saat ESDV tertutup secara tiba-tiba akibat gangguan.

4.5 Rekomendasi Spesifikasi Pipa dan Biaya Pipa

Seperti yang telah diketahui, dengan konfigurasi PIC-100 dan PIC-101 yang dipilih sesuai dengan rekomendasi, tekanan operasi tertinggi adalah 4.175 psia (4.187 psig), namun untuk mengantisipasi lonjakan tekanan yang dapat terjadi pada kejadian faktual di lapangan, tekanan desain yang digunakan untuk menentukan rekomendasi spesifikasi pipa adalah sebesar 4.300 psig (130 psig lebih besar). Perhitungan dibawah ini menggunakan persamaan 2.1 dengan parameter sesuai dengan Tabel B.1-4 pada LAMPIRAN B. berikut ini adalah hasil perhitungan yang dapat dilihat pada tabel 4.4 dan 4.5.

Tabel 4.4 Perhitungan Ketebalan Pipa Sesuai dengan SMYS

No	P _{desain} (psig)	Pipa	SMYS (psig)	Ketebalan Pipa (in)	Ketebalan Pipa Sesuai Standar API (in)
1	4.300	X56	56.000	1,191	1,250
2	4.300	X60	60.000	1,112	1,125
3	4.300	X65	65.000	1,026	1,062
4	4.300	X70	70.000	0,953	1,000
5	4.300	X80	80.000	0,834	0,875
6	4.300	X90	90.000	0,741	0,750

Tabel 4.5 Perhitungan Biaya *Carbon Steel*

No	Pipa	Berat Pipa (lb/ft)	Harga Pipa/ton (\$)	Biaya (\$)	Referensi (FOB Price)
1	X56	223,61	600	3.993.205	Zhengyang International Trade Agency Co., Ltd.
2	X60	202,75	750	4.525.861	Shandong Zhongzheng Steel Pipe Manufacturing Co., Ltd.
3	X65	192,11	800	4.574.241	Threeway Steel Co., Ltd.
4	X70	181,56	900	4.863.240	Threeway Steel Co., Ltd.
5	X80	160,03	1.000	4.762.999	Threeway Steel Co., Ltd.
6	X90	138,71	1.200	4.934.852	Shandong Zhongzheng Steel Pipe Manufacturing Co., Ltd.

Dari pertimbangan ketebalan pipa dan biaya diatas, penulis merekomendasikan untuk menggunakan spesifikasi pipa API 5L X56 dengan ketebalan pipa sebesar 1,250 inch dengan biaya sekitar \$ 3.993.205. Dengan menggunakan spesifikasi pipa ini, pipa dapat menahan beban tekanan yang terjadi di sepanjang pipa transmisi dengan biaya yang termurah.

Selain itu, spesifikasi untuk *fittings* pada pipa yang sesuai hasil simulasi adalah dengan menggunakan ANSI 16.5 Class 2500 untuk di sepanjang segmen pipa transmisi karena spesifikasi ini memiliki MAOP sebesar 5.470 psig pada suhu 300°F (lihat tabel 1 pada LAMPIRAN).

Meskipun pada simulasi *valve spacing* tidak mengikuti standar ASME B31.8 Para 846.11 (Class 2, 15 mile), hasil simulasi memperlihatkan bahwa penggunaan satu *valve* di ujung depan (VLV-100) dan ESD *valve* di ujung belakang pipa transmisi cukup mampu untuk menjaga keamanan pipa.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari simulasi yang telah dilakukan tersebut dapat diperoleh kesimpulan, yaitu:

1. Dari hasil simulasi yang diperoleh, konfigurasi yang optimal untuk sistem keamanan perpipaan adalah dengan menempatkan kontroler PIC pada aliran IS-1 yang berhubungan dengan VLV-100, serta menempatkan kontroler PIC pada aliran *Kompresi CO₂* yang berhubungan dengan daya kompresor K-5.
2. Nilai Kc dan Ti yang optimal untuk PIC-100 (menghubungkan IS-1 dengan penutupan VLV-100) pada skenario 1 adalah 4 dan 2. Nilai Kc dan Ti yang optimal untuk PIC-101 (menghubungkan *Kompresi CO₂* dengan daya kompresor K-5) pada skenario 2 adalah 2,3 dan 2,5.
3. Spesifikasi standar pipa yang digunakan untuk pipa transmisi CO₂ adalah ASME B31.8 dan API 5L X56 dengan ketebalan pipa sebesar 1,250 inch serta biaya sekitar \$ 3.993.205.
4. Spesifikasi untuk komponen perpipaan yang digunakan adalah ANSI B16.5 Class 2500.
5. Material yang digunakan adalah *carbon steel* dengan *corrosion resistance alloy clad* (CRA).

5.2 Saran

Jika penelitian ini dilakukan kembali di masa mendatang, perlu diperhatikan tingkat pemahaman dalam penggunaan simulasi dinamik dengan menggunakan suatu perangkat lunak. Perangkat lunak juga bisa menggunakan tipe yang lain, seperti OLGA, Unisim, ataupun perangkat lunak lainnya yang mampu melakukan simulasi dinamik serta menghasilkan grafik yang cukup detail.

DAFTAR PUSTAKA

- API 5L Code. (2010). *API 5LX Carbon Steel* (44th Ed). American Petroleum Institute.
- ASME Code. (1995). *ASME B31.8: Distributions and Transmissions of Gas*. American Society of Mechanical Engineers.
- AspenTech. (2003). *HYSYS 7-1 Dynamics Manual*. Aspen Technology, Inc: Cambridge USA.
- Barrie, J, K. Brown, P.R. Hatcher and H.U. Schellhase. (2006). *Carbon Dioxide Pipelines: A Preliminary Review Of Design And Risks*. Shebho-Tech Consulting Delta, British Columbia, Canada.
- Berstada T, C. Døruma, J.P. Jakobsenb, S. Kragsetb, H. Lib. (2011). *CO₂ pipeline integrity: A new evaluation methodology*. Norwegian University of Science and Technology, Dept. of Energy and Process Engineering.
- Campbell, J. M. (1982). *Gas Conditioning and Processing*, Campbell Petroleum Series.
- Carter, L. D. (2011). *Enhanced Oil Recovery and CCS*. United States Carbon Sequestration Council.
- De Visser E, Hendriks C, Barrio M, Molnvik M J, de Koeijer G, Liljemark S and le Gallo Y. (2008). *Dynamics CO₂ quality recommendations* vol.2, pp.478-484. International Journal of Greenhouse Gas Control.
- Helena Le. (2011). *Dynamic Modelling of Natural Gas Piping Systems for the Determination of Minimum Pipe Wall Temperatures*. KBR.
- Lemtek UI. (2012). *Studi Pembangunan Fasilitas Lapangan Jambaran-Tiung Biru, Blok Cepu*. Universitas Indonesia.
- Marlin, Thomas. (2000). *Process Control: Designing Process and Control System for Dynamic Performance* (2nd Ed). McGraw-Hill Book, Co: Singapore.
- McAllister, E.W. (2002). *Pipeline Rule of Thumb Handbook* (5th Ed.) Butterworth–Heinemann: England.

Mohinder L. Nayyar, P.E. Reno C. King, Sabin Crocker, M.E. (2000). *Piping Handbook*. The McGraw-Hill Companies, Inc.

Parker M E, Meyer J P and Meadows S R, (2009). *Carbon dioxide enhanced oil recovery-injection operations technologies*. Energy Procedia, Vol11, pp 3141-3148.

Paul, Shiladitya, Shepherd, Richard, Bahrami, Amir, and Woollin, Paul. (2010). *Material Selection for Supercritical CO₂ Transport*. TWI, Abington, UK.

Paul W. Parfomak, Peter Folger. (2007). *Carbon Dioxide (CO₂) Pipelines for Carbon Sequestration: Emerging Policy Issues*. Congress Research Service.

Schoeder, Donald W., (2001). *A Tutorial on Pipe Flow Equations*. Stoner Associates, Inc: Pennsylvania.

Volk, Tyler. (2008). *CO₂ Rising: The World's Greatest Challenge*. The MIT Press.

WRI. (2008). *CCS Guidelines: Guidelines for Carbon Dioxide Capture, Transport, and Storage*. World Resources Institute Report.

Publikasi Elektronik:

Aldrin, Muhammad. (2012, April). *Control valve*. 2 Mei, 2012. <http://all-thewin.blogspot.com/2012/04/control-valve.html>

Asro. (2008, Desember). *Process Equipment: Compressor Control*. 20 April, 2012. <http://asro.wordpress.com/2008/12/05/process-equipment-control-2-centrifugal-compressor-control/>

Carbon pipe user survey. (n.d). (5 April 2012)
<http://www.carbon-pipe.com/blog/post/38.html>

Engineering tool box user survey. (n.d). (2 April 2012).
http://www.engineeringtoolbox.com/ansi-carbon-stainless-steel-flanges-d_303.html

Engineering tool box user survey. (n.d). 24 Maret 2012).
http://www.engineeringtoolbox.com/ansi-carbon-stainless-steel-flanges-d_304.html

Engineering tool box user survey. (n.d). (2 April 2012).

http://www.engineeringtoolbox.com/ansi-pipes-flanges-d_216.html

VCCS user survey. (n.d). (2 Maret 2012).

<http://water.me.vccs.edu/concepts/material.html>

Wikipedia user survey. (n.d). (27 Maret 2012).

http://en.wikipedia.org/wiki/Pipe_%28fluid_conveyance%29#Materials

Wikipedia user survey. (n.d). (2 Mei 2012).

http://en.wikipedia.org/wiki/Shut_down_valve

Wikipedia user survey. (n.d). (2 Mei 2012).

<http://www.naturalgas.org/Overview/Background.Asp>

Wikipedia user survey. (n.d). (2 Mei 2012).

http://en.wikipedia.org/wiki/American_National_Standards_Institute

Wikipedia user survey. (n.d). (2 Mei 2012).

http://en.wikipedia.org/wiki/American_Petroleum_Institute

Wikipedia user survey. (n.d). (2 Mei 2012).

http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_Dioxide

LAMPIRAN A
STANDAR PERPIPAAN

Tabel A.1 Spesifikasi Standar ANSI B.16.5

<i>Maximum Allowable non-shock Pressure (psig)</i>							
Suhu (°F)	<i>Pressure Class (lb)</i>						
	150	300	400	600	900	1500	2500
	Tekanan Uji Hidrostatik (psig)						
	450	1125	1500	2225	3350	5575	9275
-20 to 100	285	740	990	1480	2220	3705	6170
200	260	675	900	1350	2025	3375	5625
300	230	655	875	1315	1970	3280	5470
400	200	635	845	1270	1900	3170	5280
500	170	600	800	1200	1795	2995	4990
600	140	550	730	1095	1640	2735	4560
650	125	535	715	1075	1610	2685	4475
700	110	535	710	1065	1600	2665	4440
750	95	505	670	1010	1510	2520	4200
800	80	410	550	825	1235	2060	3430
850	65	270	355	535	805	1340	2230
900	50	170	230	345	515	860	1430
950	35	105	140	205	310	515	860
1000	20	50	70	105	155	260	430

Tabel A.2 ASME/ANSI B16.5-1996 Pipe Flanges and Flanged Fittings - Class
1500 Flanges

Pipe Size (inches)	Outside Diameter (inches)	Inside Diameter (inches)	Number of Bolt Holes	Bolt Hole Diameter (inches) ¹⁾	Bolt Circle (inches)
1/2	4-3/4	0.88	4	7/8	3-1/4
3/4	5-1/8	1.09	4	7/8	3-1/2
1	5-7/8	1.36	4	1	4
1-1/4	6-1/4	1.70	4	1	4-3/8
1-1/2	7	1.95	4	1-1/8	4-7/8
2	8-1/2	2.44	8	1	6-1/2
2-1/2	9-5/8	2.94	8	1-1/8	7-1/2
3	10-1/2	3.57	8	1-1/4	8
4	12-1/4	4.57	8	1-3/8	9-1/2
5	14-3/4	5.66	8	1-5/8	11-1/2
6	15-1/2	6.72	12	1-1/2	12-1/2
8	19	8.72	12	1-3/4	15-1/2
10	23	10.88	12	2	19
12	26-1/2	12.88	16	2-1/8	22-1/2
14	29-1/2	-	16	2-3/8	25
16	32-1/2	-	16	2-5/8	27-3/4
18	36	-	16	2-7/8	30-1/2
20	38-3/4	-	16	3-1/8	32-3/4
24	46	-	16	3-5/8	39

Tabel A.3 API 5LX

Table 6C—Plain-End Line Pipe Dimensions, Weights, and Test Pressures for Sizes 6 5/8 Through 80—Continued

(1)		(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)
Designation		Outside Diameter, <i>D</i> (in.) ^a	Wall Thickness, <i>t</i> (in.) ^a	Plain-End Weight, <i>w_{pe}</i> (lb/ft)	Inside Diameter, <i>d</i> (in.)	Minimum Test Pressure (psi) ^b											
Nominal Size	Wall					Grade A		Grade B		Grade X42	Grade X46	Grade X52	Grade X56	Grade X60	Grade X65	Grade X70	Grade X80
		Std.	Alt.	Std.	Alt.												
16		160.20	1.000	160.20	14.000	2250	2800	2620	2800	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
16		169.43	1.062	169.43	13.876	2390	2800	2790	2800	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
16		178.72	1.125	178.72	13.750	2530	2800	2800	2800	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
16		187.93	1.188	187.93	13.624	2670	2800	2800	2800	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
16		196.91	1.250	196.91	13.500	2800	2800	2800	2800	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
18 ^c		35.76	0.188	35.76	17.624	380	470	440	550	750	820	920	990	1070	1150	1240	1420
18 ^c		41.59	0.219	41.59	17.562	440	550	510	640	870	950	1080	1160	1240	1340	1450	1650
18 ^c		47.39	0.250	47.39	17.500	500	620	580	730	990	1090	1230	1320	1420	1530	1650	1890
18 ^c		53.18	0.281	53.18	17.438	560	700	660	820	1110	1220	1380	1490	1590	1730	1860	2120
18		58.94	0.312	58.94	17.376	620	780	730	910	1240	1360	1530	1650	1770	1920	2060	2360
18		64.87	0.344	64.87	17.312	690	860	800	1000	1360	1496	1690	1820	1950	2110	2270	2600
18	Std.	70.59	0.375	70.59	17.250	750	940	880	1090	1490	1630	1840	1980	2120	2300	2480	2830
18		76.29	0.406	76.29	17.188	810	1020	950	1180	1610	1760	1990	2150	2300	2490	2680	3000
18		82.15	0.438	82.15	17.124	880	1100	1020	1280	1740	1900	2150	2320	2480	2690	2900	3000
18		87.81	0.469	87.81	17.062	940	1170	1090	1370	1860	2040	2300	2480	2660	2880	3000	3000
18	XS	93.45	0.500	93.45	17.000	1000	1250	1170	1460	1980	2170	2460	2640	2830	3000	3000	3000
18		104.67	0.562	104.67	16.876	1120	1400	1310	1640	2230	2440	2760	2970	3000	3000	3000	3000
18		115.98	0.625	115.98	16.750	1250	1560	1460	1820	2480	2720	3000	3000	3000	3000	3000	3000
18		127.21	0.688	127.21	16.624	1380	1720	1610	2010	2730	2990	3000	3000	3000	3000	3000	3000
18		138.17	0.750	138.17	16.500	1500	1880	1750	2190	2980	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
18		149.06	0.812	149.06	16.376	1620	2030	1890	2370	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
18		160.03	0.875	160.03	16.250	1750	2190	2040	2550	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
18		170.92	0.938	170.92	16.124	1880	2340	2190	2740	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
18		181.56	1.000	181.56	16.000	2000	2500	2330	2800	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
18		192.11	1.062	192.11	15.876	2120	2660	2480	2800	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
18		202.75	1.125	202.75	15.750	2250	2800	2620	2800	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
18		213.31	1.188	213.31	15.626	2370	2800	2770	2800	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
18		223.61	1.250	223.61	15.500	2500	2800	2800	2800	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000

SPECIFICATION FOR LINE PIPE

LAMPIRAN B
PARAMETER ASME B31.8

Tabel B.1 *Pipe Seam Join Factor*

Speciflcatlon	Pipe Class	Seam Jolnt Factor (E)
ASTM A53	Seamless	1
	Electric Resistance Welded	1
	Furnace Lap Welded	0.8
	Furnace Butt Welded	0.6
ASTM A106	Seamless	1
ASTM A134	Electric Fusion Arc Welded	0.8
ASTM A135	Electric Resistance Welded	1
ASTM A139	Electric Fusion Welded	0.8
ASTM A211	Spiral Welded Pipe	0.8
ASTM A333	Seamless	1
ASTM A333	Welded	1
ASTM A381	Double Submerged Arc Welded	1
	Arc Welded	1
ASTM A671	Electric-Fusion-Welded	1
ASTM A672	Electric-Fusion-Welded	1
ASTM A691	Electric-Fusion-Welded	1
API 5L	Seamless	1
	Electric Resistance Welded	1
	Electric Flash Welded	1
	Submerged Arc Welded	1
	Furnace Lap Welded	0.8
	Furnace Butt Welded	0.6
API 5LX	Seamless	1
	Electric Resistance Welded	1
	Electric Flash Welded	1
	Submerged Arc Welded	1
API 5LS	Electric Resistance Welded	1
	Submerged Arc Welded	1

Tabel B.2 Faktor Desain untuk Pipa Baja

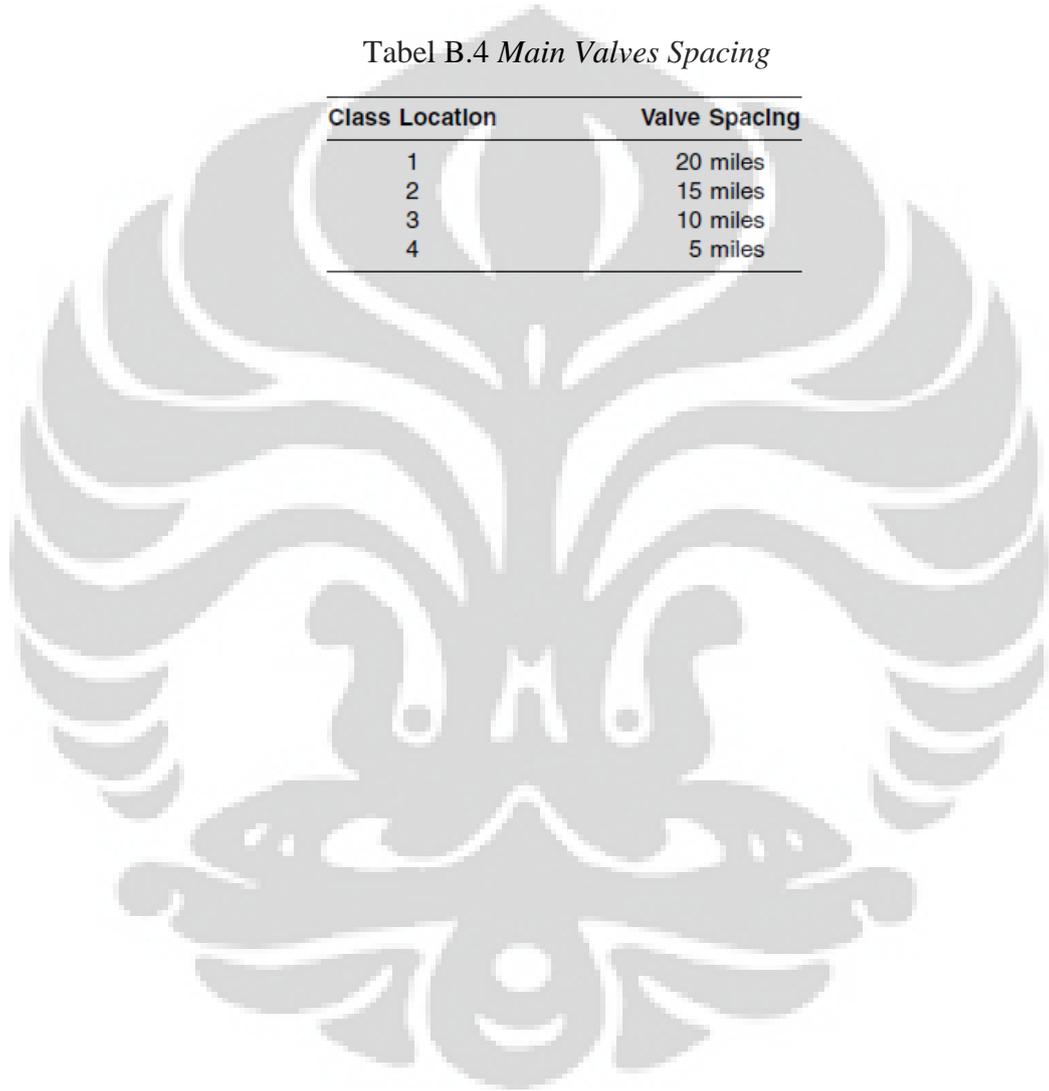
Class Location	Design Factor, <i>F</i>
1	0.72
2	0.60
3	0.50
4	0.40

Tabel B.3 *Temperature Deration Factor*

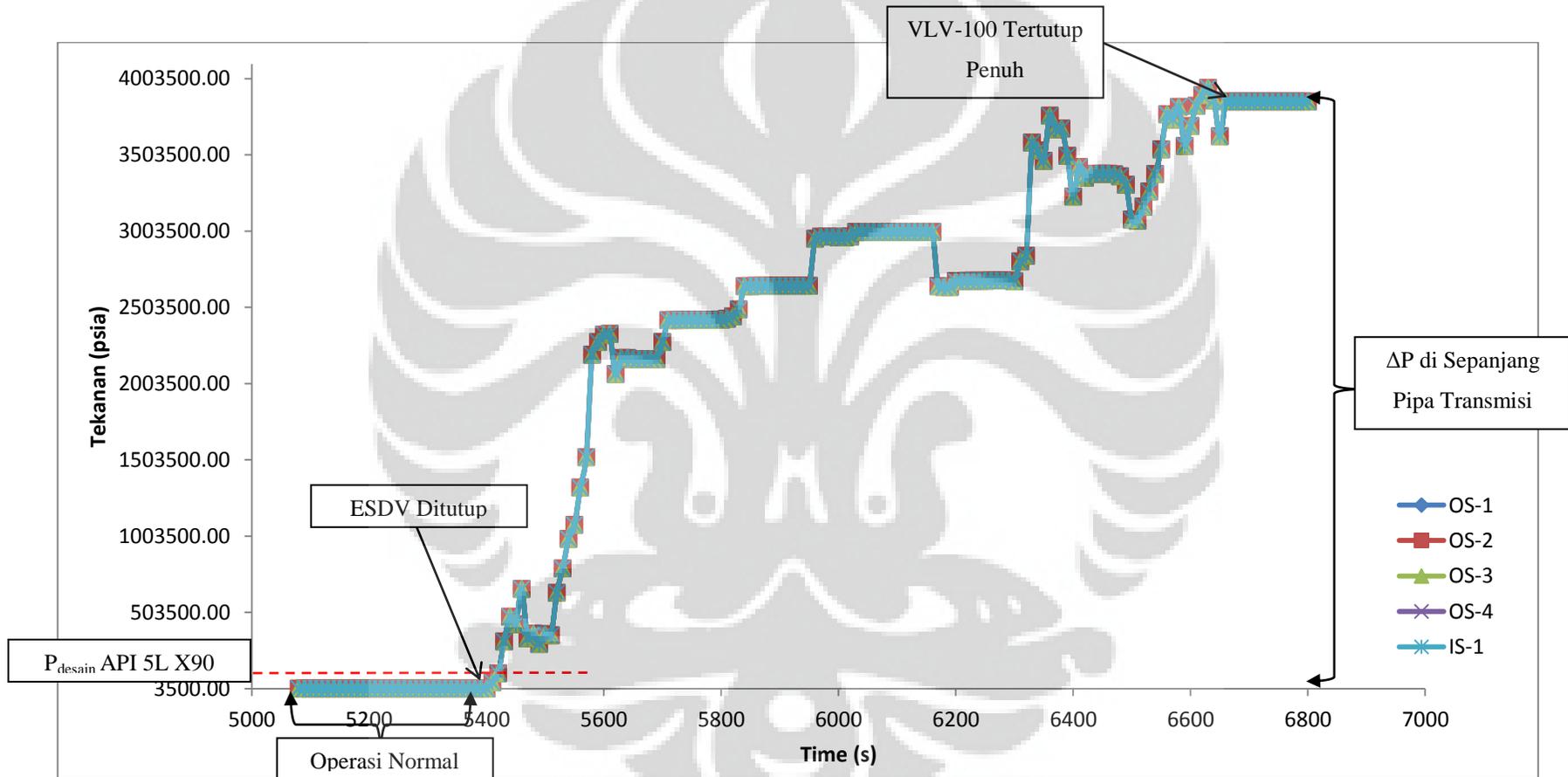
Temperature		Deration Factor <i>T</i>
°F	°C	
250 or less	121 or less	1.000
300	149	0.967
350	177	0.033
400	204	0.900
450	232	0.867

Tabel B.4 *Main Valves Spacing*

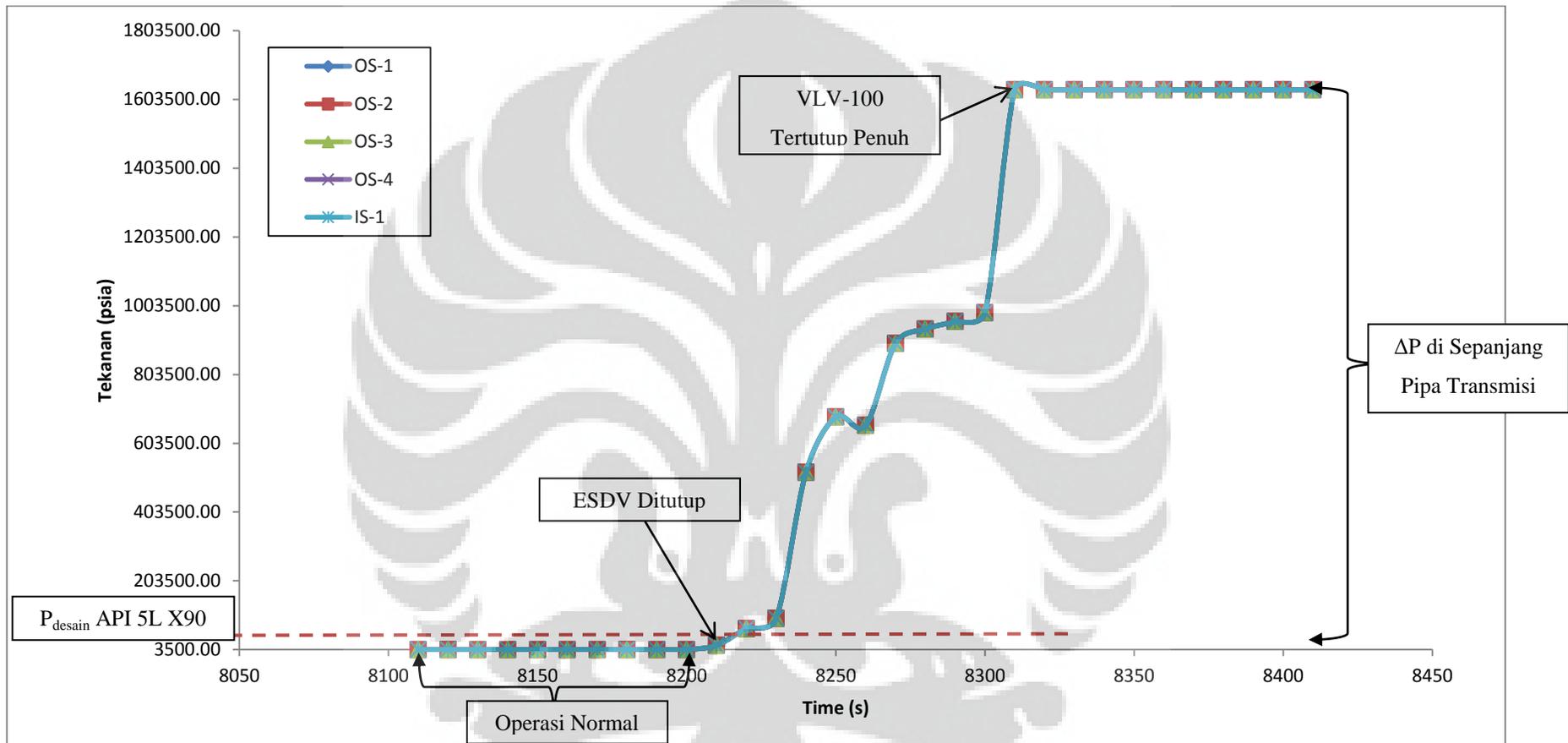
Class Location	Valve Spacing
1	20 miles
2	15 miles
3	10 miles
4	5 miles



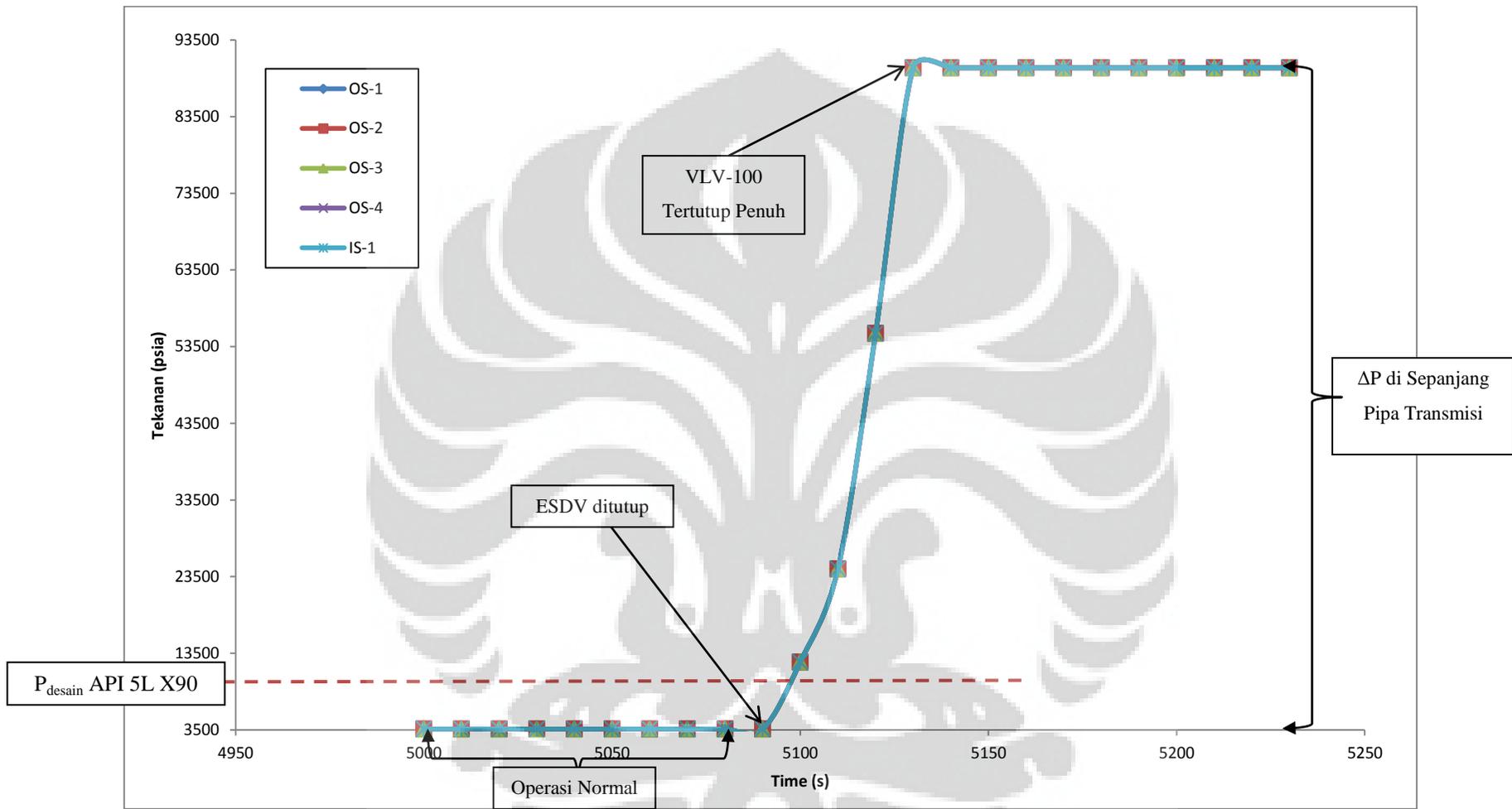
LAMPIRAN C
HASIL SIMULASI



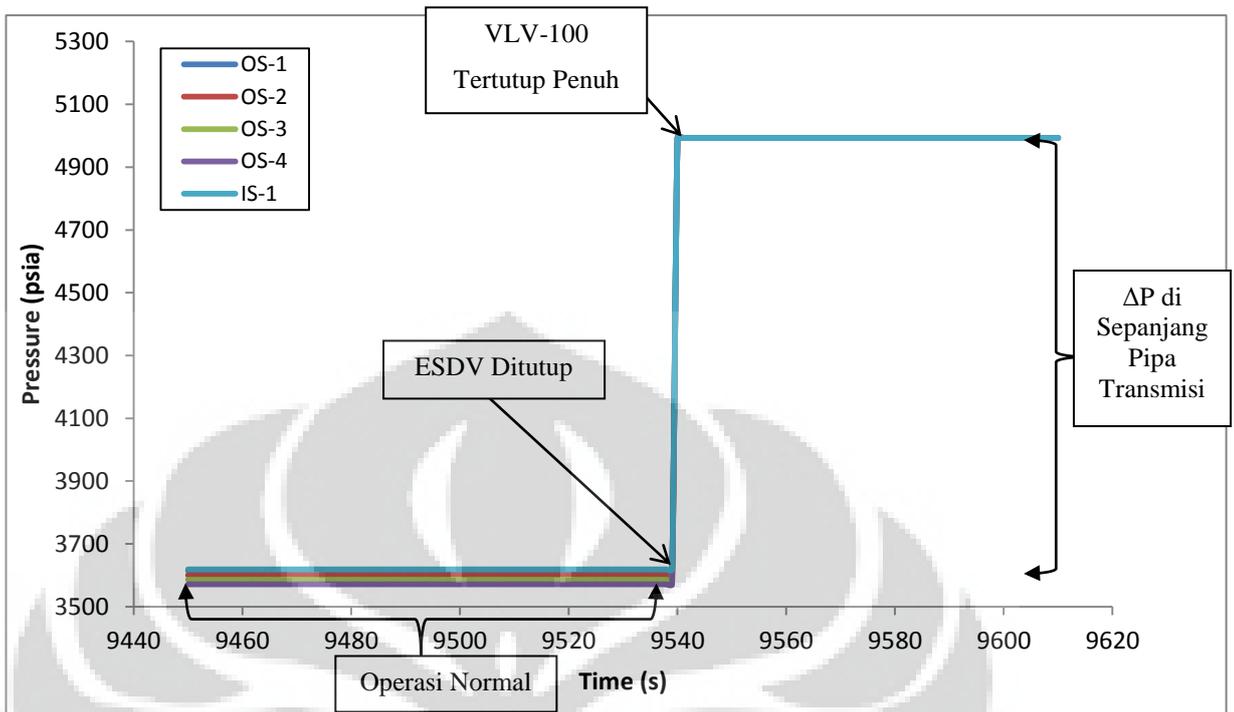
Gambar C.1 Grafik Tekanan di Sepanjang Pipa Transmisi dengan PIC-100 di OS-4 ($K_c = 0.25$ dan $T_i = 1$)



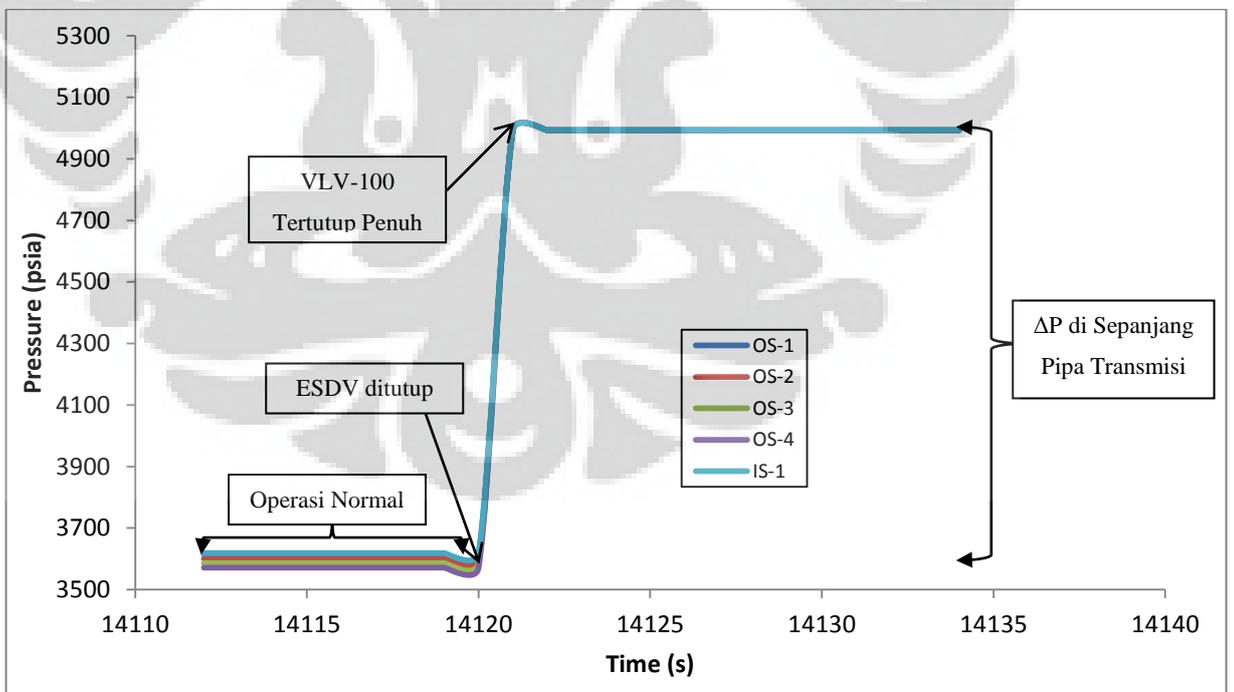
Gambar C.2 Grafik Tekanan di Sepanjang Pipa Transmisi dengan PIC-100 di OS-4 ($K_c = 2$ dan $T_i = 1$)



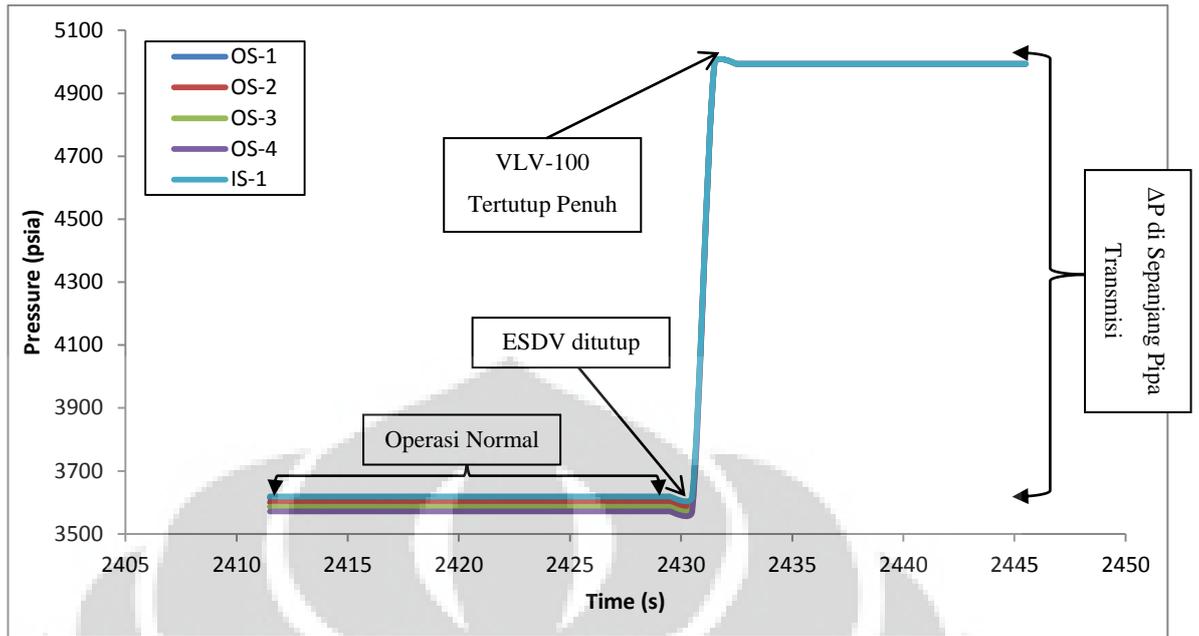
Gambar C.3 Grafik Tekanan di Sepanjang Pipa Transmisi dengan PIC-100 di OS-4 ($K_c = 3$ dan $T_i = 2$)



Gambar C.4 Grafik Tekanan di Sepanjang Pipa Transmisi dengan PIC-100 pada OS-3 ($K_c = 4$, $T_i = 2$)



Gambar C.5 Grafik Tekanan di Sepanjang Pipa Transmisi dengan PIC pada OS-2 ($K_c = 4$, $T_i = 2$)



Gambar C.6 Grafik Tekanan di Sepanjang Pipa Transmisi dengan PIC pada OS-1
($K_c = 4$, $T_i = 2$)