



TUGAS AKHIR - TF 181801

**RANCANG BANGUN SISTEM PENGENDALIAN
FUZZY PI PADA *MINI PLANT* SEPARATOR TIGA FASA
MENGUNAKAN *INTERFACE* DCS BERBASIS *WIRELESS*
SENSOR NETWORK DAN IOT SECARA *REAL-TIME***

Sapto Wahyu Sudrajat
NRP. 0231154000053

Dosen Pembimbing:
Dr. Suyanto, S.T., M.T.

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

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT - TF 181801

***DESIGN OF FUZZY PI CONTROL SYSTEM ON
THREE PHASE SEPARATOR MINI PLANT USING DCS
INTERFACE BASED ON REAL-TIME WIRELESS SENSOR
NETWORK AND IOT***

**Sapto Wahyu Sudrajat
NRP. 0231154000053**

Supervisors:
Dr. Suyanto, S.T., M.T.

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

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama : Sapto Wahyu Sudrajat
NRP : 02311540000053
Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FT-IRS)
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “**Rancang Bangun Sistem Pengendalian Fuzzy PI Pada Mini Plant Separator Tiga Fasa Menggunakan Interface DCS Berbasis Wireless Sensor Network dan Iot Secara Real-time**” adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada tugas akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya-benarnya.

Surabaya, 05 Agustus 2020

Yang membuat pernyataan,

A yellow postage stamp from Indonesia, featuring the Garuda Pancasila emblem and the text 'KEMENTERIAN PERKURANGAN RI', 'POS TERAI', '1000', and 'RUPIAH'. The stamp number is '30AHF496660071'. A handwritten signature in black ink is written over the stamp.

Sapto wahyu Sudrajat

NRP. 02311540000053

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

**RANCANG BANGUN SISTEM PENGENDALIAN FUZZY PI PADA
MINI PLANT SEPARATOR TIGA FASA MENGGUNAKAN
INTERFACE DCS BERBASIS WIRELESS SENSOR NETWORK DAN
IOT SECARA REAL-TIME**

Oleh:

Sapto Wahyu Sudrajat

NRP. 0231154000053

Surabaya,

Menyetujui,
Pembimbing



Dr. Suvanto, S.T., M.T

NIP. 19711113319951002

Mengetahui,

**Kepala Departemen
Teknik Fisika FT-IRS ITS**



Dr. Suvanto, S.T., M.T

NIP. 19711113319951002

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

**RANCANG BANGUN SISTEM PENGENDALIAN FUZZY PI PADA
MINI PLANT SEPARATOR TIGA FASA MENGGUNAKAN
INTERFACE DCS BERBASIS WIRELESS SENSOR NETWORK DAN
IOT SECARA REAL-TIME**

TUGAS AKHIR





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

Oleh:

Sapto Wahyu Sudrajat

NRP. 0231154000053

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

- | | | |
|--|--|-----------------|
| 1. Dr. Suyanto, S.T., M.T. |  | (Pembimbing 1) |
| 2. Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc. |  | (Ketua Penguji) |
| 3. Erna Septyaningrum, S.T., M.T. |  | (Penguji 1) |
| 4. Moh. Kamalul Wafi, S.T., M.Sc.DIC. |  | (Penguji 2) |

SURABAYA

2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

**RANCANG BANGUN SISTEM PENGENDALIAN
FUZZY PI PADA MINI PLANT SEPARATOR TIGA FASA
MENGUNAKAN *INTERFACE* DCS BERBASIS *WIRELESS*
SENSOR NETWORK DAN IOT SECARA *REAL-TIME***

Nama : Sapto Wahyu Sudrajat
NRP : 0231154000053
Departemen : Teknik Fisika FT-IRS ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Suyanto, S.T., M.T.

ABSTRAK

Separator tiga fasa berfungsi memisahkan material dari sumur pengeboran minyak menjadi fasa minyak, air, dan gas. Sistem kontrol yang sesuai harus digunakan untuk memastikan separator bekerja optimal. Saat ini, metode tuning PID tidak memberikikan respon sistem yang optimal. Beberapa masalah yang terjadinya adalah *overshoot*, *steady state error*, dan ketidakstabilan sistem. Selain itu, *tuning* sering dilakukan secara *trial and error* yang memakan waktu. Pada penelitian ini dilakukan perancangan sistem pengendalian dengan metode Fuzzy-PI, sistem monitoring dengan *interface* DCS dan IoT, serta sistem transmisi data dengan WSN. Sistem Fuzzy bekerja seperti logika manusia, tidak membutuhkan model matematis yang akurat, serta dapat bekerja pada sistem yang tidak linear. Hasil penelitian menunjukkan sistem pengendalian Fuzzy PI mampu meningkatkan performansi sistem pengendalian level dengan menghasilkan respon dinamik yang lebih baik dari sistem pengendalian PI yang ditunjukkan dengan nilai *rise time* 402 s, *settling time* 492 s, *maximum overshoot* 0.05%, dan *error steady state* 0.02%

Kata Kunci: Separator, Fuzzy-PI, DCS, IoT, WSN.

Halaman ini sengaja dikosongkan

**DESIGN OF FUZZY PI CONTROL SYSTEM ON
THREE PHASE SEPARATOR MINI PLANT USING DCS
INTERFACE BASED ON REAL-TIME WIRELESS SENSOR
NETWORK AND IOT**

Name : Sapto Wahyu Sudrajat
NRP : 0231154000053
Department : Engineering Physics FT-IRS ITS
Supervisors : Dr. Suyanto, S.T., M.T.

ABSTRACT

The three-phase separator functions to separate material from an oil well drilling into a phase of oil, water, and gas. Appropriate control systems must be used to ensure the separator is working optimally. Nowadays, the PID tuning method does not provide an optimal system response. Some of the problems that occur are overshoot, steady-state error, and system instability. Moreover, trial and error in tuning is often done until time runs out. In this research, a control system is designed using the fuzzy-PI method, a monitoring system with DCS and IoT interfaces, and also a data transmission system with WSN. Fuzzy systems work like human logic, do not require accurate mathematical models, and can work on systems that are not linear. The results showed that the Fuzzy PI control system improved the performance of the level control system by producing a better dynamic response compared to the PI controls indicated by the rise time of 402 s, settling time 492 s, maximum overshoot 0.05%, and steady state errors of 0.02%.

Keywords: *Separator, Fuzzy-PI, DCS, IoT, WSN.*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Dengan menyebut nama Allah Yang Maha Pengasih Lagi Maha Penyayang, puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT. Atas rahmat dan hidayahnya sehingga laporan tugas akhir ini yang berjudul “Rancang Bangun Sistem Pengendalian Fuzzy PI Pada *Mini Plant* Separator Tiga Fasa Menggunakan *Interface DCS* Berbasis *Wireless Sensor Network* dan *Iot Secara Real-time*” dapat terselesaikan dengan baik.

Dalam penulisan ini, penulis banyak dibantu oleh berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan terimakasih kepada:

1. Bapak Dr. Suyanto, S.T., M.T. selaku Kepala departemen Teknik Fisika ITS.
2. Bapak Dr. Suyanto, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing tugas akhir ini atas waktu dan bimbingan konsultasi yang telah diberikan.
3. Bapak Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc., Ibu Erna Septyaningrum, S.T., M.T., dan Bapak Moh. Kamalul Wafi, S.T., M.Sc.DIC. selaku penguji tugas akhir, yang telah memberikan masukan kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir.
4. Segenap Bapak/Ibu dosen pengajar di Departemen Teknik Fisika - ITS.
5. Segenap keluarga terutama kedua orang tua penulis yang telah memberikan dukungan penuh dalam penyelesaian tugas akhir ini.
6. Teman - teman angkatan 2015 Teknik Fisika - ITS, yang senantiasa memberikan motivasi dan perhatian.
7. Admin Labkom e205 yang senantiasa memberikan dukungan.

Surabaya, 5 Agustus 2020

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
COVER PAGE.....	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	v
LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR	vii
LEMBAR PENGESAHAN	ix
ABSTRAK	xi
ABSTRACT	xiii
KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR	xxi
DAFTAR TABEL.....	xxiii
DAFTAR SIMBOL.....	xxv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Sistematika Laporan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	5
2.1 Proses Separasi Tiga Fasa	5
2.2 Logika Fuzzy	6
2.2.1 Himpunan Fuzzy	6
2.2.2 Fungsi Keanggotaan Fuzzy	7

2.2.3	Struktur Dasar Logika Fuzzy.....	8
2.3	Pengendali Proportional Integral Derivative (PID)	9
2.3.1	Pengendali Proportional	10
2.3.2	Pengendali <i>Integral</i>	10
2.3.3	Pengendali <i>Derivative</i>	11
2.4	Wireless Sensor Network.....	11
2.5	Internet of Things.....	12
2.5.1	Arsitektur Internet of Things	13
2.5.2	Elemen Internet of Things	14
2.6	Distributed Control System (DCS)	14
2.6.1	Human Machine Interface	15
2.6.2	Open Process Communication (OPC)	16
2.7	Mikrokontroler.....	17
2.7.1	NXP Kinetis K66 MCU.....	18
2.7.2	ESP8266	19
2.8	Sensor Tekanan Udara	20
2.9	Aktuator Servo <i>Valve</i>	21
2.10	Modul komunikasi <i>wireless</i> 2.4 Ghz	21
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		23
3.1	Identifikasi Plan	24
3.2	Perancangan <i>mini plant</i>	25
3.2.1	Perancangan mekanik	25
3.2.2	Perancangan elektrik.....	27
3.3	Pemodelan Matematis	30
3.3.1	Pemodelan Tinggi Air	32
3.3.2	Pemodelan Tinggi Minyak	33

3.3.3	Pemodelan Aktuator	34
3.3.4	Pemodelan Sensor	35
3.4	Perancangan Protokol Komunikasi WSN	37
3.5	Pengujian Pemodelan Matematis	38
3.6	Pengujian Protokol Komunikasi WSN.....	39
3.7	Perancangan <i>interface</i> DCS dan IoT	40
3.7.1	Perancangan interface DCS.....	40
3.7.2	Perancangan sistem IoT	41
3.8	Integrasi <i>Plant</i> , Sistem Komunikasi, dan <i>Interface</i>	42
3.9	Perancangan dan Implementasi menggunakan Kontroler PI.....	42
3.10	Perancangan dan Implementasi menggunakan Kontroler Fuzzy PI.....	44
3.10.1	Fuzzifikasi	44
3.10.2	Perancangan rule <i>base</i>	45
3.10.3	Defuzzifikasi	46
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		47
4.1	Analisa Hasil Uji Pemodelan Matematis.....	47
4.2	Analisa Hasil Uji Protokol Komunikasi WSN	49
4.3	Analisa Hasil Uji Kontroler PI	49
4.4	Analisa Hasil Uji Kontroler Fuzzy PI	52
4.5	Analisa Perbandingan Hasil Uji Pengendali Fuzzy PI dengan PI	53
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		55
5.1	Kesimpulan.....	55
5.2	Saran	55
DAFTAR PUSTAKA		57
LAMPIRAN.....		61
BIODATA PENULIS		66

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1	Arsitektur umum system SCADA (Boyer, 2010)	2
Gambar 2. 1	P&ID Separator Tiga Fasa (enggcyclopedia, 2011).....	5
Gambar 2. 2	Keanggotaan fuzzy segitiga (Karakose, Yetis and Akin, 2018)	7
Gambar 2. 3	Keanggotaan Fuzzy Trapesium (Karakose, Yetis and Akin, 2018)...	8
Gambar 2. 4	Arsitektur Kontrol Logika Fuzzy (Passino and Yurkovich, 2010)	9
Gambar 2. 5	Arsitektur wireless sensor network (Lu <i>et al.</i> , 2016)	12
Gambar 2. 6	Arsitektur IoT (Al-Fuqaha <i>et al.</i> , 2015)	13
Gambar 2. 7	Elemen IoT (Al-Fuqaha <i>et al.</i> , 2015)	14
Gambar 2. 8	Komponen utama DCS (Mokhatab <i>et al.</i> , 2013).....	15
Gambar 2. 9	Arsitektur HMI (Knapp, 2011b)	16
Gambar 2. 10	Arsitektur OPC (Knapp, 2011a).....	17
Gambar 2. 11	Arsitektur mikrokontroler (Toulson and Wilmshurst, 2012)	17
Gambar 2. 12	Arsitektur Kinetis K66 (<i>Kinetis K66 32-bit MCUs NXP</i> , 2020)..	18
Gambar 2. 13	Mikrokontroler Kinetis K66 (<i>PJRC</i> , 2020).....	19
Gambar 2. 14	Arsitektur ESP8266 (<i>MicrochipUA</i> , 2015).....	19
Gambar 2. 15	Hardware ESP8266 (<i>MicrochipUA</i> , 2015).....	19
Gambar 2. 16	Arsitektur BMP085 (Sensortec, 2011)	20
Gambar 2. 17	<i>Hardware</i> BMP085 (Sensortec, 2011).....	20
Gambar 2. 18	Servo valve (DonVito, 2016)	21
Gambar 2. 19	Hardware Zigbee 802.15.4 (Digi, 2018)	22
Gambar 3. 1	Diagram alir penelitian.....	23
Gambar 3. 2	P&ID Separator 3 Fasa (PERTAMINA EP, 2017).....	25
Gambar 3. 3	Skema separator	26
Gambar 3. 4	Rancangan <i>miniplant</i>	26
Gambar 3. 5	<i>Miniplant</i> separator	27
Gambar 3. 6	Skema sistem elektrik.....	28
Gambar 3. 7	Skema dan realisasi sensor tekanan	28
Gambar 3. 8	Pemasangan <i>control valve</i>	29

Gambar 3. 9 Rangkain kontroler <i>slave</i>	29
Gambar 3. 10 Kontroler <i>master</i>	30
Gambar 3. 11 <i>Cross section</i> dari separator	30
Gambar 3. 12 Model matematis tinggi air	33
Gambar 3. 13 Model matematis tinggi minyak	34
Gambar 3. 14 Model aktuator	35
Gambar 3. 15 Model sensor	36
Gambar 3. 16 Integrasi model	36
Gambar 3. 17 Topologi <i>star</i> (Digi, 2018)	37
Gambar 3. 18 Konfigurasi perangkat <i>master</i>	37
Gambar 3. 19 Konfigurasi perangkat <i>slave</i>	38
Gambar 3. 20 Pengujian pemodelan matematis	39
Gambar 3. 21 Pengujian protokol komunikasi WSN	39
Gambar 3. 22 <i>Interface</i> DCS	41
Gambar 3. 23 Sistem IoT	42
Gambar 3. 24 <i>Step respon</i> sistem	42
Gambar 3. 25 Fungsi keanggotaan <i>error</i>	44
Gambar 3. 26 Visualiasi output K_p dan K_i	46
Gambar 4. 1 Grafik Respon Level Air	47
Gambar 4. 2 Hasil Pengujian Kontroler PI pada Level Air	50
Gambar 4. 3 Hasil Pengujian Kontroler PI pada Level Minyak	50
Gambar 4. 4 Respon Level Air dengan Pengendali Fuzy PI	52
Gambar 4. 5 Respon Level Minyak dengan Pengendali Fuzy PI	53
Gambar 4. 6 Perbandingan Respon Pengendali Fuzzy PI dengan PI	54

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 2 Spesifikasi Zigbee modules (Digi, 2018).....	21
Tabel 3. 1 Dimensi Separator (PERTAMINA EP, 2017)	24
Tabel 3. 2 Data parameter proses (PERTAMINA EP, 2017)	24
Tabel 3. 3 Dimensi <i>miniplant</i>	26
Tabel 3. 4 <i>Rule base</i>	45
Tabel 3. 5 <i>Output Kp dan Ki</i>	46
Tabel 4. 1 Perbandingan hasil uji <i>input step</i> level air	48
Tabel 4. 2 Performa sistem komunikasi WSN	49
Tabel 4. 3 Respon Dinamik Level Air dengan Pengendali PI	50
Tabel 4. 4 Respon Dinamik Level Minyak dengan Pengendali PI	51
Tabel 4. 5 Respon Dinamik Level Air dengan Variasi Kp dan Ti.....	51
Tabel 4. 6 Respon Dinamik Level Minyak dengan Variasi Kp dan Ti.....	51
Tabel 4. 7 Respon Dinamik Level Air dengan Pengendali Fuzzy PI.....	52
Tabel 4. 8 Respon Dinamik Level Air dengan Pengendali Fuzzy PI.....	53
Tabel 4. 9 Respon Dinamik Level Air dengan Pengendali Fuzzy PI.....	54

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR SIMBOL DAN ISTILAH

A	Luasan <i>cross sectional</i> separator (m ²)
β	Lebar cairan (m)
CO	<i>Controller output</i>
DS	<i>Slope different</i>
<i>e</i>	<i>error</i>
<i>h</i>	Tinggi cairan
K	Gain
<i>l</i>	Panjang separator (m)
P	Tekanan (hPa)
PB	<i>Proportional band</i>
PV	<i>Process variable</i>
Q	Debit (m ³ /s)
<i>r</i>	<i>Output sistem</i>
<i>r_i</i>	<i>Integration rate</i>
T	Waktu (s)
μ	Derajat keanggotaan fuzzy
<i>u</i>	<i>Output pengendali</i>
V	<i>Volume cairan</i> (m ³)
<i>y</i>	<i>Set point</i>
LT	<i>Level transmitter</i>
PT	<i>Pressure transmitter</i>
LV	<i>Level valve</i>
PV	<i>Pressure valve</i>
LC	<i>Level controller</i>
PC	<i>Pressure controller</i>

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

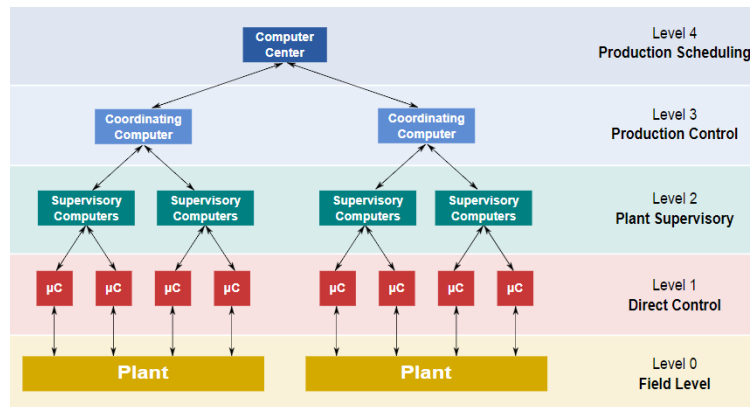
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PT Pertamina EP merupakan perusahaan milik negara yang bergerak dalam bidang energi meliputi minyak dan gas bumi. Selain itu perusahaan juga aktif melakukan riset dan pengembangan teknologi *Enhanced Oil Recovery* (EOR) *Waterflooding* untuk meningkatkan cadangan dan produksi. Untuk mendukung pengemangan *pilot project* EOR *waterflooding* di *plant* Pendopo kabupaten Jirak, perusahaan menambah beberapa fasilitas berupa *Free Water Knock Out* (FWKO), *Skimming Tank*, *Transfer Pump*, *Flare Stack*, dan *Reverse Demulsifier Package*. Metode EOR *waterflooding* menggunakan air sebagai bahan utama untuk diinjeksikan ke daerah sumur pengeboran. Air injeksi berasal dari fluida sumur pengeboran yang kemudian dipisahkan sesuai kebutuhan menggunakan FWKO atau separator tiga fasa. Separator menerima fluida dari *manifold high pressure* dan aliran sopa dengan tekanan diatas 50 psig, Air terproduksi akan menuju *produced water tank*, minyak akan menuju *crude oil storage tank*, dan gas akan dialirkan menuju *flare stack*. Berdasarkan standar perusahaan, tekanan dan level fluida pada separator harus tetap dijaga. Tekanan maksimum tidak boleh melebihi 90 psig, sedangkan level fluida maksimum adalah 73 inch (PERTAMINA EP, 2017).

Saat ini, pengoperasian separator di *plant* Pendopo menggunakan sistem SCADA. Secara tradisional, sistem SCADA dioperasikan menggunakan skema *monolithic datacenter* terpusat dengan jumlah *wiring* yang luas (Galloway and Hancke, 2013). Karena terbatasnya akses ke *wiring* ini, sistem keamanan hanya berfokus pada perlindungan fisik (Alcaraz, Fernandez and Carvajal, 2012). Saat ini, penggunaan teknologi *wireless sensor network*(WSN) sangat menjanjikan untuk proses industri otomasi. Dengan fleksibilitas penggunaan dan arsitektur *self-organizing* nya membuat WSN lebih tahan terhadap kegagalan sistem secara menyeluruh, tidak seperti pada arsitektur kabel (Chen *et al.*, 2011). Selain itu, kemampuan memperluas jangkauan radio melalui komunikasi *multihop* berguna untuk melakukan implementasi di area penyebaran *plant* yang lebih luas. Namun

dalam menerapkan sistem WSN, proses akuisisi data pada sistem SCADA perlu dirubah. Contohnya, sistem akuisisi data yang awalnya secara langsung dikirim dari sensor ke ruang kontrol perlu dirubah menjadi sistem jaringan berbasis *gateway*.



Gambar 1. 1 Arsitektur umum system SCADA (Boyer, 2010)

Dari segi metode kontrol, penggunaan metode tuning harus digunakan untuk memastikan separator bekerja dengan optimal. Sebagian besar kasus metode tuning PID tidak memberikan respon sistem yang optimal, diantaranya : *overshoot*, *offset*, *steady state error*, dan ketidakstabilan sistem. Selain itu, metode tuning PID sering dilakukan secara *trial and error*, sehingga banyak memakan waktu. Oleh karena itu dibutuhkan metode tuning yang optimal serta tahan terhadap perubahan karakteristik plant.

Pada penelitian ini dilakukan perancangan sistem pengendalian dengan metode Fuzzy-PI, sistem monitoring dengan *interface* DCS dan IoT, serta sistem transmisi data dengan WSN. Sistem Fuzzy bekerja seperti logika manusia, tidak membutuhkan model matematis yang akurat, serta dapat bekerja pada sistem yang tidak linear.

1.2 Rumusan Masalah

Dari uraian latar belakang yang telah dijelaskan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a) Apakah pengendalian Fuzzy PI dapat meningkatkan performansi sistem pengendalian level pada *mini plant* separator tiga fasa dibandingkan dengan pengendalian PI ?
- b) Apakah sistem komunikasi WSN pada *mini plant* separator tiga fasa dapat berkomunikasi jarak jauh secara *real-time* ?

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a) Menganalisis performansi sistem pengendalian level pada *mini plant* separator tiga fasa menggunakan pengendalian Fuzzy PI dibandingkan dengan pengendalian PI.
- b) Menganalisis performansi sistem komunikasi WSN pada *mini plant* separator tiga fasa yang ditampilkan pada *interface* DCS dan IoT.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a) Data yang digunakan dan data pengukuran terbatas pada skala laboratorium.
- b) Fasa yang digunakan adalah fasa air dan minyak.
- c) Karakteristik *Control Valve* dianggap linear.
- d) Laju aliran input konstan.

1.5 Sistematika Laporan

Sistematika penulisan laporan penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a) BAB I PENDAHULUAN
Pada bab I ini terdiri dari latar belakang, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah dan sistematika laporan.
- b) BAB II TINJAUAN PUSTAKA
Pada bab II ini dibahas mengenai teori-teori yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan.
- c) BAB III METODOLOGI
Pada bab III ini berisi mengenai rancangan dari penelitian yang dilakukan, metode dan langkah-langkah dalam penelitian.
- d) BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab IV ini berisi tentang analisa hasil perancangan sistem kendali fuzzy-PI dan *monitoring*

e) **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

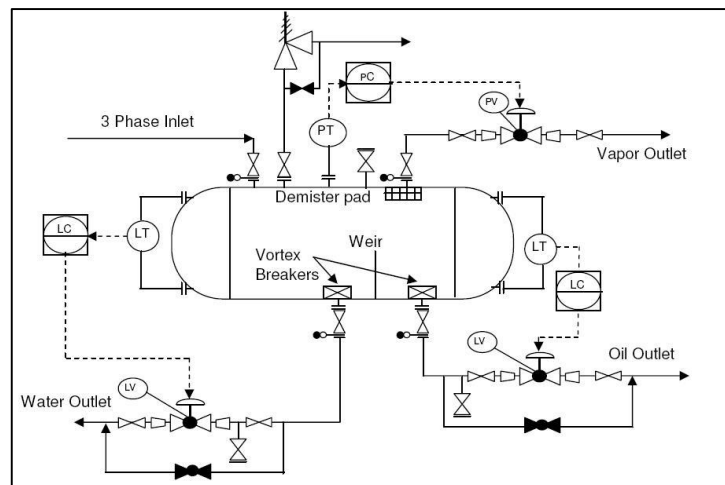
Pada bab V ini diberikan kesimpulan dari penelitian tugas akhir yang telah dilakukan berdasarkan hasil yang diperoleh, serta diberikan saran sebagai penunjang maupun pengembangan tugas akhir selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Proses Separasi Tiga Fasa

Proses Separasi minyak adalah proses utama di fasilitas produksi petroleum dimana fluida dari sumur pengeboran dipisahkan komponennya. Terdapat 2 jenis separator yaitu dua dan tiga fasa. Pada tiga fasa, fluida dari sumur pengeboran dipisahkan menjadi air, minyak dan gas (Ghaffarkhah *et al.*, 2017). Sedangkan separator dua fasa, fluida dari sumur pengeboran dipisahkan menjadi cairan dan gas. Proses separasi umumnya mengandalkan konsep gravitasi dan massa jenis, pada penelitian ini fokus pada separator tiga fasa yang bisa meningkatkan kualitas produksi karena proses pemisahan fluida bisa memenuhi kriteria *sales*, sedangkan gas bisa dimanfaatkan untuk *power plan*.



Gambar 2. 1 P&ID Separator Tiga Fasa (enggcyclopedia, 2011)

Setelah proses pemanasan fluida dari sumur pengeboran, fluida akan menuju ke separator. di unit ini dilakukan pemisahan dan pengukuran produksi fluida yang dihasilkan. Tekanan pada separator harus tetap dijaga pada 52 psig. Pada kasus saat terjadi tekanan tinggi, sistem kendali akan segera mengeksekusi *emergency shutdown* (ESD) dan membuka ESD *valve* secara otomatis untuk membuang kelebihan tekanan gas melalui *flare*. *Pressure Safety Valve* (PSV) dengan

pengaturan 90 psig dipasang pada tanki separator untuk melindungi sistem. Minyak dialirkan dari separator menggunakan *level control valve*. Air dialirkan dari separator juga menggunakan *level control valve*. Sedangkan gas umumnya dialirkan ke *unit flare* (PERTAMINA EP, 2017).

2.2 Logika Fuzzy

Logika fuzzy didasarkan atas pemikiran bahwa tidak semua sistem di dunia ini tegas, deterministik, serta dapat dinyatakan dengan “ya” atau “tidak”. Seiring dengan meningkatnya kompleksitas sistem maka kemampuan untuk mendeskripsikan perilaku sistem secara presisi juga akan meningkat secara signifikan. Logika fuzzy yang pertama kali diusulkan oleh L.A. Zadeh pada tahun 1965 memungkinkan adanya nilai di antara “ya” (dinyatakan dengan nilai 1) dan “tidak” (dinyatakan dengan nilai 0) sehingga suatu kebenaran tidak hanya dibatasi oleh pernyataan benar atau salah, namun terdapat derajat keanggotaan yang menyatakan kebenaran atau kesalahan tersebut (Pospíchal, 1996).

2.2.1 Himpunan Fuzzy

Himpunan fuzzy merupakan pengelompokan objek berdasarkan variabel bahasa (linguistik) yang dinyatakan dalam bentuk fungsi keanggotaan fuzzy. Sebuah himpunan fuzzy pada suatu semesta pembicaraan X dinyatakan oleh fungsi yang memetakan setiap anggota X dengan derajat keanggotaan pada *interval* antara 0 sampai dengan 1. Fungsi tersebut dinamakan fungsi keanggotaan atau fungsi karakteristik. Terdapat tiga operator standar yang digunakan dalam pengoperasian himpunan fuzzy, yaitu komplemen, gabungan (*union*), dan irisan (*intersection*) (Pospíchal, 1996).

a) Komplemen (NOT)

Operator komplemen menyatakan negasi dalam keanggotaan himpunan fuzzy, yang dinyatakan dengan:

$$\mu_A^c = 1 - \mu_A[x] \quad (2.1)$$

b) Gabungan (OR)

Operator gabungan menghasilkan nilai keanggotaan maksimum pada elemen himpunan-himpunan yang bersangkutan, dinyatakan dengan :

$$\mu_{A \cup B} = \max(\mu_A[x], \mu_B[y]) \quad (2. 2)$$

c) Irisan (AND)

Operator irisan pada himpunan bilangan fuzzy menyatakan nilai derajat keanggotaan minimum pada elemen dari himpunan yang bersangkutan, dinyatakan sebagai berikut :

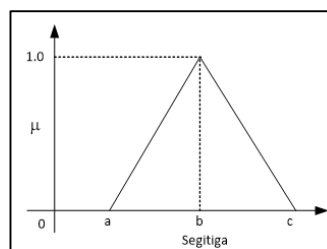
$$\mu_{A \cap B} = \min(\mu_A[x], \mu_B[y]) \quad (2. 3)$$

2.2.2 Fungsi Keanggotaan Fuzzy

Fungsi keanggotaan adalah suatu kurva yang menunjukkan pemetaan titik-titik input data ke dalam nilai keanggotaan (derajat keanggotaan) yang memiliki nilai antara 0 sampai dengan 1. Beberapa representasi fungsi keanggotaan fuzzy yang sering digunakan antara lain:

a) Representasi Segitiga

Fungsi keanggotaan fuzzy dengan representasi kurva berbentuk segitiga pada dasarnya merupakan gabungan dari dua kurva linier naik dan turun. Representasi kurva segitiga dibatasi oleh tiga parameter yaitu a, b, dan c untuk menentukan nilai derajat keanggotaan fuzzy $\mu[x]$.



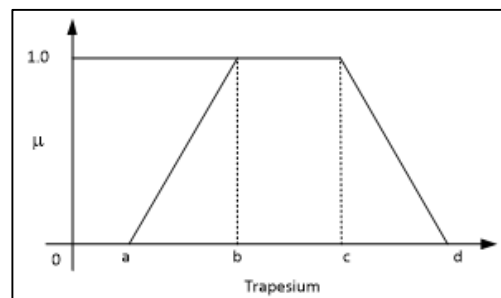
Gambar 2. 2 Keanggotaan fuzzy segitiga (Karakose, Yetis and Akin, 2018)

Persamaan fungsi keanggotaan fuzzy untuk representasi berbentuk segitiga yaitu:

$$\mu[x] = \begin{cases} 0; & x \leq a \text{ atau } x \geq c \\ (x - a)/(b - a); & a \leq x \leq b \\ (b - x)/(c - b); & b \leq x \leq c \end{cases} \quad (2. 4)$$

b) Representasi Trapesium

Fungsi keanggotaan fuzzy dengan representasi berbentuk trapesium dibatasi oleh tiga parameter a , b , c , dan d .



Gambar 2. 3 Keanggotaan Fuzzy Trapesium (Karakose, Yetis and Akin, 2018)

Untuk menentukan nilai derajat keanggotaan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\mu[x] = \begin{cases} 0; & x \leq a \text{ atau } x \geq d \\ (x - a)/(b - a); & a \leq x \leq b \\ 1; & b \leq x \leq c \\ (d - x)/(d - c); & c \leq x \leq d \end{cases} \quad (2.5)$$

Selain dua jenis representasi fungsi keanggotaan fuzzy di atas, terdapat bentuk representasi lain diantaranya representasi bentuk bahu, representasi bentuk S (pertumbuhan dan penyusutan), serta representasi bentuk lonceng yang terbagi menjadi tiga kelas yaitu kurva himpunan phi, kurva beta, dan kurva gauss (Pospíchal, 1996).

2.2.3 Struktur Dasar Logika Fuzzy

Pengendali logika fuzzy memiliki empat komponen utama, yaitu fuzzifikasi, *rule-base*, mekanisme inferensi, dan defuzzifikasi.

a) Fuzzifikasi

Proses fuzzifikasi berperan mengubah memodifikasi input agar dapat dinyatakan dan dibandingkan dengan aturan yang terdapat di dalam *rule-base*

dengan cara mengubah masukan *crisp* menjadi nilai derajat keanggotaan pada himpunan fuzzy. Proses ini melibatkan perancangan input dari logika fuzzy dengan menggunakan *membership function*. Masukan bilangan *crisp* dikonversi menjadi nilai derajat keanggotaan fuzzy pada proses ini.

b) *Rule-base*

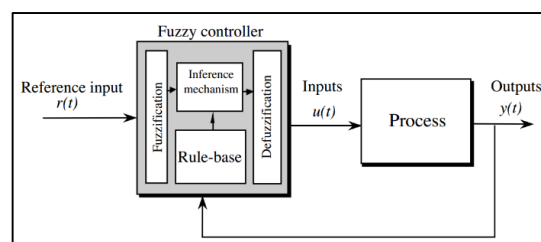
Rule-base berisi pengetahuan dalam bentuk sekelompok aturan yang menentukan bagaimana logika fuzzy bekerja untuk menghasilkan pengendalian yang sesuai. Perancangan rule-base pada sistem fuzzy dapat dinyatakan dengan kalimat if-then maupun dengan tampilan berupa tabel.

c) *Mekanisme inferensi*

Mekanisme inferensi bertugas mengevaluasi aturan pengendalian yang relevan untuk waktu tertentu dan menentukan nilai yang akan menjadi input untuk *plant*.

d) *Defuzzifikasi*

Proses defuzzifikasi merupakan proses konversi dari kesimpulan yang telah dihasilkan oleh mekanisme inferensi agar dapat menjadi input bagi *plant* (bilangan *crisp*). (Passino and Yurkovich, 2010)



Gambar 2. 4 Arsitektur Kontrol Logika Fuzzy (Passino and Yurkovich, 2010)

2.3 Pengendali Proportional Integral Derivative (PID)

PID mempunyai tiga komponen pengendali, yaitu : *Proportional*, *Integral*, dan *Derivative*. Dalam penerapannya, ketiga pengendali tersebut dijumlahkan untuk mendapatkan output yang akan diproses oleh elemen kontroler.

2.3.1 Pengendali Proportional

Output pengendali *proportional* sebanding dengan *error* sistem yang dinyatakan pada persamaan 2.6.

$$u(t) = K_p e(t) = K_p (r(t) - y(t)) \quad (2.6)$$

ketika nilai *error* besar maka K_p juga harus dinaikan, begitu juga sebaliknya. Berikut merupakan *transfer function* dari pengendali proporsional.

$$C(s) = K_p \quad (2.7)$$

Penggunaan pengendali *proportional* harus memperhatikan kondisi *steady state error*. Saat sistem berada pada kondisi stabil, *steady state error* harus bernilai nol. Proses pengaturan ini bisa dilakukan dengan menambahkan atau mengurangi konstanta bias secara manual (Visioli and Zhong, 2011). Pengaturan nilai bias dapat dilihat pada persamaan 2.8.

$$u(t) = K_p e(t) + u_b \quad (2.8)$$

Proportional gain dalam dunia insdustri juga sering disebut *proportional band* (PB), yang merupakan *range* dari error yang menyebabkan perubahan *full range* dari variabel kontrol (Visioli and Zhong, 2011).

$$PB = \frac{100}{K_p} \quad (2.9)$$

2.3.2 Pengendali Integral

Output pengendali integral berhubungan dengan nilai *error* sebelumnya. Nilai *error* tersebut akan diakumulasi dan dikalikan dengan *gain* pengendali integral (Goodwin, Graebe and Salgado, 2007). Persamaan pengendali integral dalam domain waktu dinyatakan pada persamaan 2.10.

$$u(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2.10)$$

Dalam doamin frekuensi, fungsi transfer pengendali integral dinyatakan pada persamaan 2.11.

$$C(s) = \frac{Ki}{s} \quad (2.11)$$

2.3.3 Pengendali *Derivative*

Ketika *output* pengendali *proportioanal* berdasarkan *error* sistem saat itu dan *output* pengendali *integral* berdasarkan *error* sistem sebelumnya, *output* pengendali *derivative* akan memprediksi nilai *error* selanjutnya (C. Goodwin *et al.*, 2011). Persamaan pengendali *derivative* yang ideal dinyatakan dalam persamaan 2.12

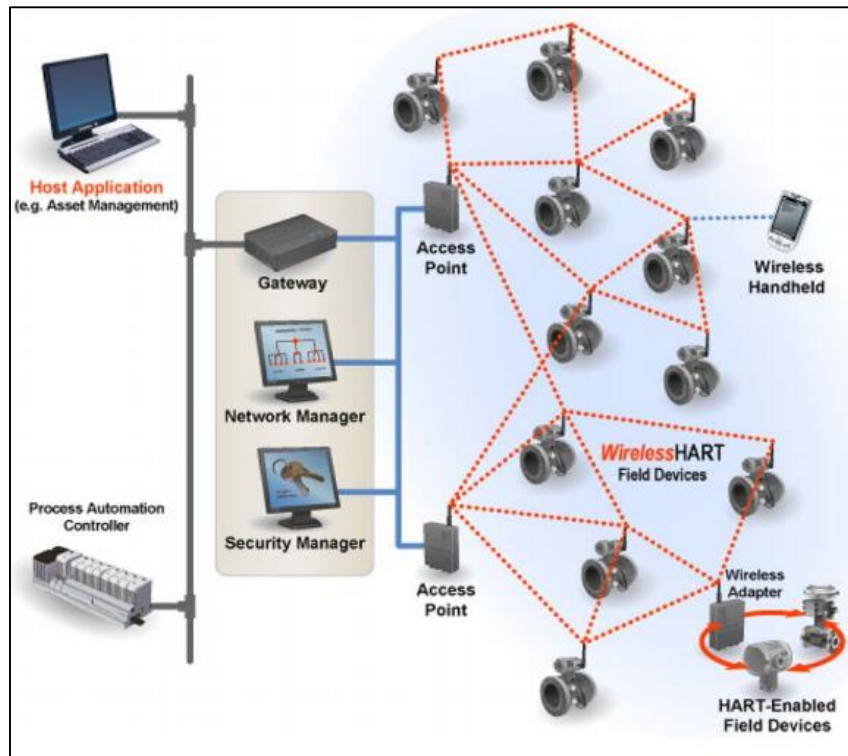
$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.12)$$

Dalam domain frekuensi, fungsi transfer pengendali integral dinyatakan pada persamaan 2.13.

$$C(s) = K_d s \quad (2.13)$$

2.4 Wireless Sensor Network

Perusahaan industri setiap tahunnya selalu mencari solusi yang dapat meningkatkan stabilitas sistem, *fault tolerant*, *flexibility*, dan efisiensi biaya. Salah satu solusi untuk sistem industri saat ini yang banyak dikembangkan adalah *cyber physical system* (CPS) (Sajid, Abbas and Saleem, 2016). CPS menggunakan teknologi *cyber* dan proses *physical* yang terintegrasi untuk meningkatkan kualitas komunikasi data. Implementasi dari CPS kebanyakan diterapkan pada *wireless sensor network* (WSN) yang mampu membantu menampung data dalam jumlah banyak dari sistem *physical* dan secara langsung akan dikirim ke sistem *cyber* (Sajid, Abbas and Saleem, 2016). Arsitektur WSN dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2. 5 Arsitektur wireless sensor network (Lu *et al.*, 2016)

Sistem WSN pada setiap *node* nya terdapat *sensing unit*(termasuk sensor dan *analog to digital converter*), *processing unit*, *transceiver unit*, dan *power unit*. WSN merupakan arsitektur protokol komunikasi yang menjajikan untuk perkembangan industri. Arsitektur WSN paling sederhana terdiri dari dua komponen utama, yaitu *node* dan *base station*. Arsitektur ini dapat meningkatkan efektifitas suatu sistem karena biaya alat dan instalasi rendah (Lu *et al.*, 2016).

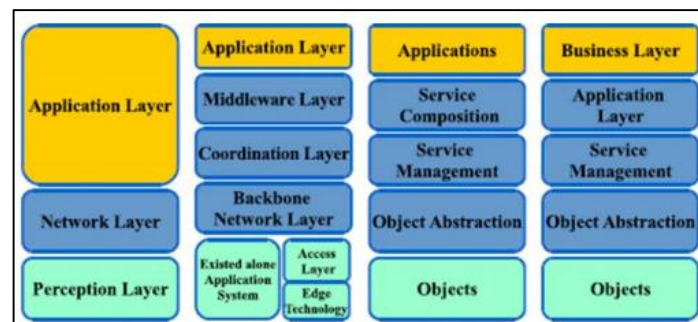
2.5 Internet of Things

Sejak peluncuran internet yang pertama pertama pada tahun 1969, internet telah menjadi sistem utama yang menghubungkan jutaan komputer dan menawarkan lebih dari 4 miliar pengguna untuk komunikasi, bisnis, dan penelitian harian (*Internet Live Stats - Internet Usage & Social Media Statistics*, 2020). Jumlahnya terus bertambah karena perangkat portabel dan khususnya ponsel pintar memungkinkan pengguna untuk terhubung ke internet secara instan. Pada tahun 2011, jumlah *gadget* yang saling terkoneksi telah melebihi jumlah penduduk dunia sebanyak dua miliar (Gubbi *et al.*, 2013). Pesatnya perkembangan teknologi

internet telah merambah dari *user* ke objek, yang sekarang dinamakan *internet of things*. Pada hari ini, teknologi IoT telah banyak ditemukan pada kehidupan sehari-hari, seperti *smart house*, transportasi, sistem pertahanan, serta sektor industri. Pada akhirnya, *International Data Corporation* memperkirakan bahwa 212 miliar objek pintar akan terhubung pada akhir tahun 2020, menempati 45% dari seluruh lalu lintas internet dan menantang penyedia layanan untuk membangun koneksi jaringan yang lebih cepat dan handal. Produsen perangkat pintar juga harus bisa menyesuaikan dengan teknologi saat ini (Gantz, Reinsel and Shadows, 2012).

2.5.1 Arsitektur Internet of Things

Karena jumlah objek yang pintar dan terhubung terus bertambah, kebutuhan akan model arsitektur referensi IoT sangat dibutuhkan. Konsep arsitektur bertujuan untuk memberikan referensi yang terbukti untuk pengembangan sistem yang lebih kompleks. Secara umum, arsitektur IoT dapat dikategorikan ke dalam empat kelompok, yaitu *pattern-oriented architecture*, *distributed system*, *adaptive system* dan *interactive system*. Karena IoT akan menghubungkan sejumlah besar objek heterogen dan komponen jaringan, dibutuhkan arsitektur pattern-oriented yang fleksibel dan mudah dikembangkan (Al-Fuqaha *et al.*, 2015).



Gambar 2. 6 Arsitektur IoT (Al-Fuqaha *et al.*, 2015)

Objects layer merepresentasikan bagian terendah dalam model arsitektur IoT, yaitu berupa sensor dan aktuator yang terpasang pada objek fisik. Sensor membaca data dan informasi dari lingkungan, contohnya suhu, tekanan, posisi saat ini, akselerasi serta proses fisis lainnya. Sedangkan aktuator adalah perangkat yang dapat mengubah listrik menjadi energi yang akan bereaksi pada lingkungan (Al-Fuqaha *et al.*, 2015). *Object abstraction* berfungsi sebagai *transmitter* antara *object layer* dengan *service management layer*. Tugasnya adalah mengirim data yang

dikumpulkan secara aman menggunakan berbagai teknologi komunikasi seperti 3G, WiFi atau *Bluetooth Layer* ini juga berhubungan dengan *big data* dan *cloud computing*. *Service management layer* atau disebut *middleware layer* berfungsi mengumpulkan dan mengirim kembali data terkoleksi ke *service layer* (Khan *et al.*, 2012). *Application layer* mempunyai peran menampilkan semua data ke *user*, seperti menampilkan data sensor. *Bussiness layer* berperan sebagai mengintegrasikan semua data dalam model bisnis atau dalam dunia otomasi disebut *Enterprise Resource Planning (ERP)* (Khan *et al.*, 2012).

2.5.2 Elemen Internet of Things

Berkembangnya teknologi, IoT saat ini banyak model arsitektur yang berbeda, namun harus tetap disesuaikan dengan 6 elemen utama penyusun IoT, seperti yang tertera pada Gambar 2.7.



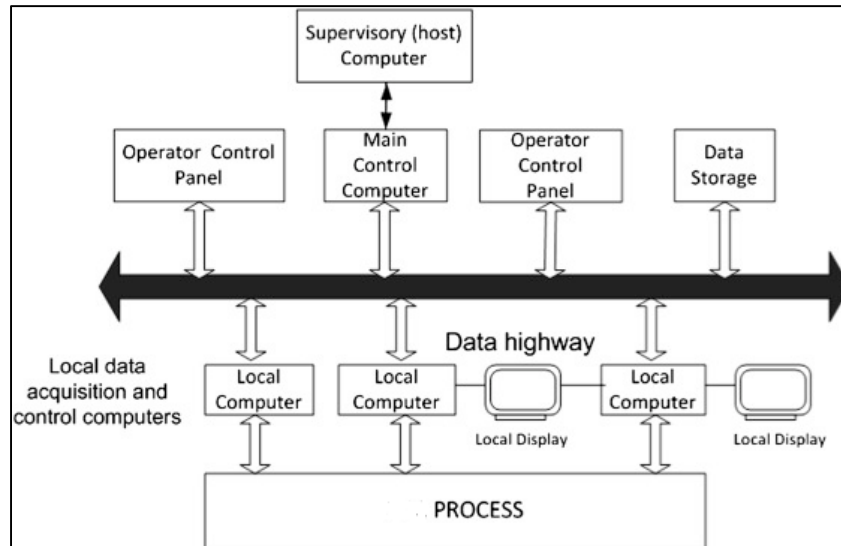
Gambar 2. 7 Elemen IoT (Al-Fuqaha *et al.*, 2015)

Identifcation berfungsi memberikan ID unik pada setiap komponen yang akan dibaca. *Sensing* berfungsi membaca data dan informasi dari setiap komponen seperti sensor suhu, sensor tekanan, sensor level, posisi saat ini dll. *Communication* berfungsi mentransfer semua data yang telah terbaca ke *platform* selanjutnya, bias dikirim secara lokal maupun melalui internet. *Computation* berfungsi sebagai media akuisisi data dan pengolah data yang telah diterima, komputasi dapat dilakukan pada *device* lokal maupun *cloud computing*. *Service* dan *semantic* berfungsi mengolah data ke sistem yang lebih kompleks (Al-Fuqaha *et al.*, 2015).

2.6 Distrubuted Control System (DCS)

Distributed control system merupakan paket perangkat lunak komputer yang dapat berkomunikasi dengan *control hardware* dan menampilkan tampilan antarmuka terpusat atau *human machine interface (HMI)* untuk semua perangkat

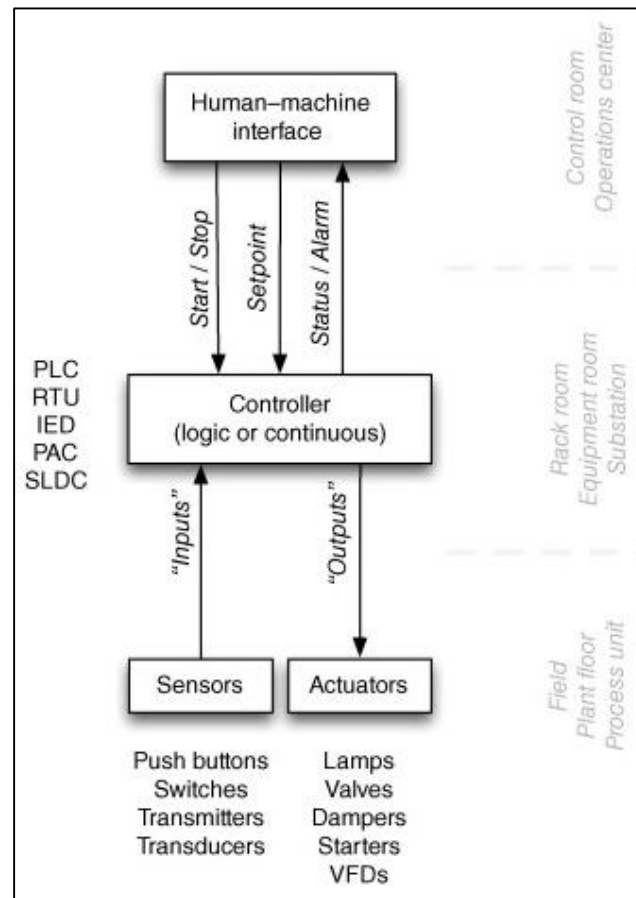
yang dikendalikan. DCS dapat menggantikan perangkat relay dan dapat diprogram dengan mudah, mudah dalam melakukan *diagnostic* dan perbaikan (Dunn, 2014). Komponen utama DCS ditunjukkan pada Gambar 2.8



Gambar 2. 8 Komponen utama DCS (Mokhatab *et al.*, 2013)

2.6.1 Human Machine Interface

HMI *interface* digunakan operator *plant* untuk berinteraksi dengan *programmable logic controller* (PLC), *remote terminal unit* (RTU), dan *intelligent end device* (IED). HMI menggantikan kontaktor fisik dan kontrol elektrik lainnya dengan sistem *digital graphical representations* untuk berinteraksi dengan *plant*. HMI memungkinkan operator untuk mulai dan mengakhiri siklus, mengatur *set points*, dan proses lainnya yang berkaitan (Knapp, 2011b). Arsitektur HMI ditunjukkan pada Gambar 2.9.

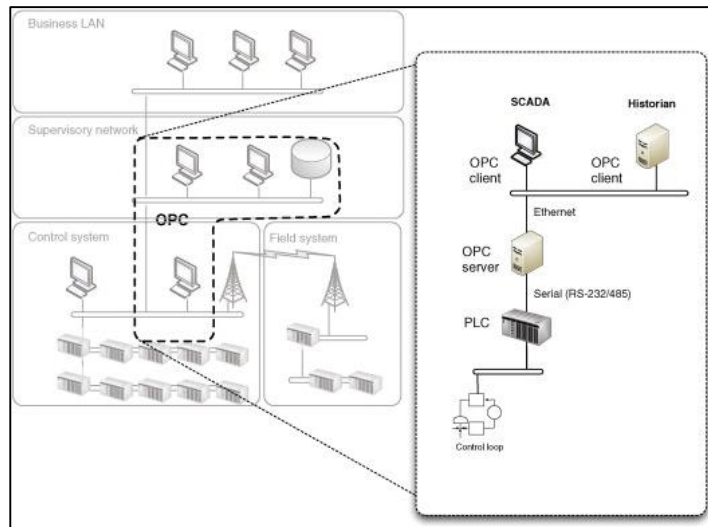


Gambar 2. 9 Arsitektur HMI (Knapp, 2011b)

Salah satu *software* HMI yang digunakan dalam penelitian ini adalah Simatic WinCC V7.

2.6.2 Open Process Communication (OPC)

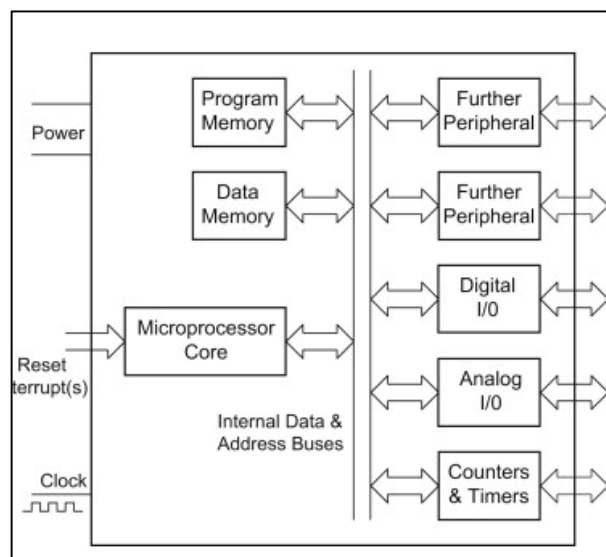
Sesuai dengan namanya, OPC digunakan pada proses komunikasi industri, meliputi *data logger*, data HMI, data serial *fieldbus protocol*, dan komunikasi *supervisory controls* lainnya. Arsitektur OPC memungkinkan adanya integrasi data dari semua protokol komunikasi yang bisa diatur secara lokal. OPC berbasis *windows interconnection*, sehingga yang berbasis dari *fieldbus* bisa diterjemahkan oleh sistem operasi windows (Knapp, 2011a).



Gambar 2. 10 Arsitektur OPC (Knapp, 2011a)

2.7 Mikrokontroler

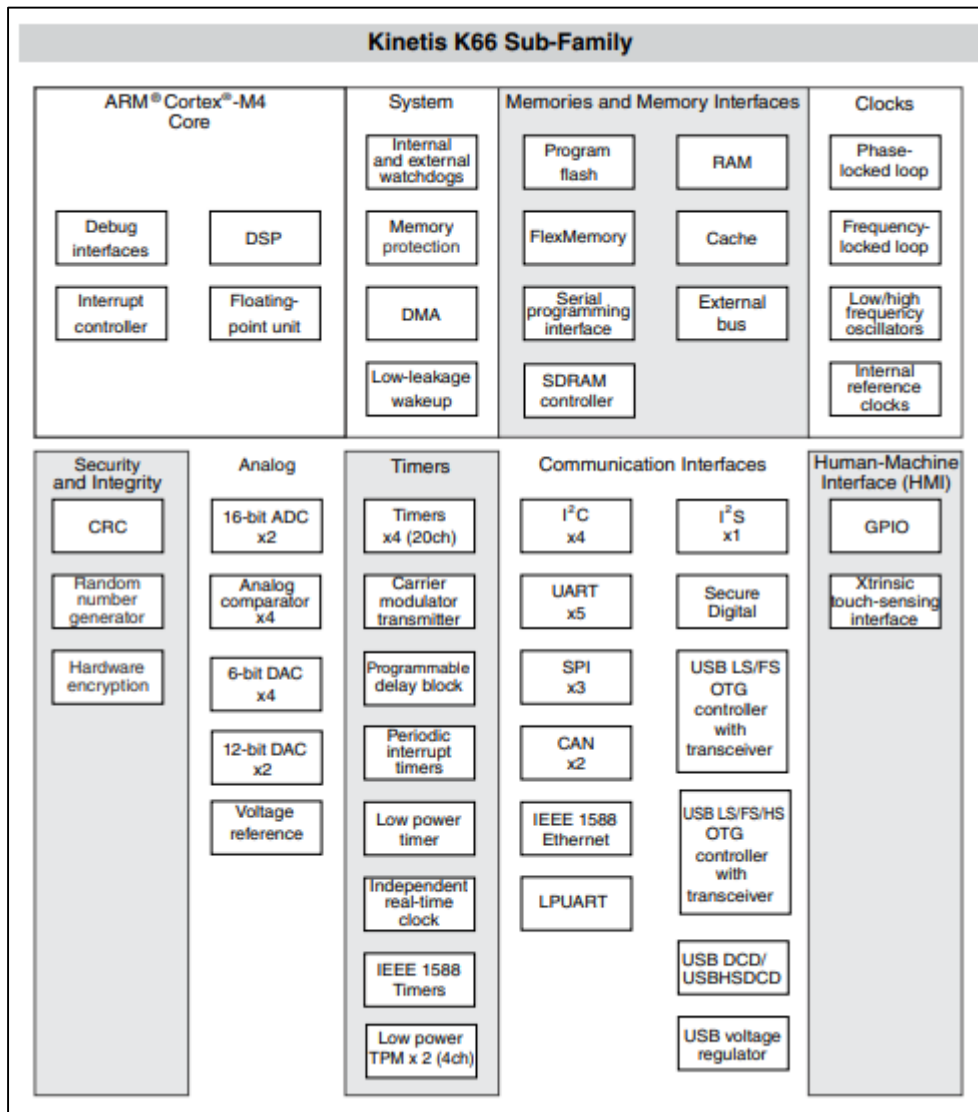
Mikrokontroler adalah *chip* tunggal komputer yang didalamnya terdapat *microprocessor*, *memory*, dan modul *input output*. Tergantung dari tingkat kompleksitasnya, beberapa mikrokontroler terdapat komponen tambahan seperti *counters*, *timers*, *interrupt control*, modul komunikasi serial, *analog to digital converter* (ADC), dan *digital signal processing* (DSP) (Ibrahim, 2019).



Gambar 2. 11 Arsitektur mikrokontroler (Toulson and Wilmshurst, 2012)

2.7.1 NXP Kinetis K66 MCU

Kinetis K66 merupakan mikrokontroler dengan berbasis 32 Bit ARM Cortex-M4 dengan kecepatan 180 Mhz (*Kinetis K66 32-bit MCUs / NXP, 2020*). Dalam penelitian ini, mikrokontroler ini difungsikan sebagai mikrokontroler *slave* yang akan melakukan proses akuisisi data sensor, komputasi kontrol pada mini *miniplant*, serta proses komunikasi data antar node sensor dan mikrokontroler *master*. Arsitektur Kinetis K66 ditunjukkan pada Gambar 2.12



Gambar 2. 12 Arsitektur Kinetis K66 (*Kinetis K66 32-bit MCUs / NXP, 2020*)

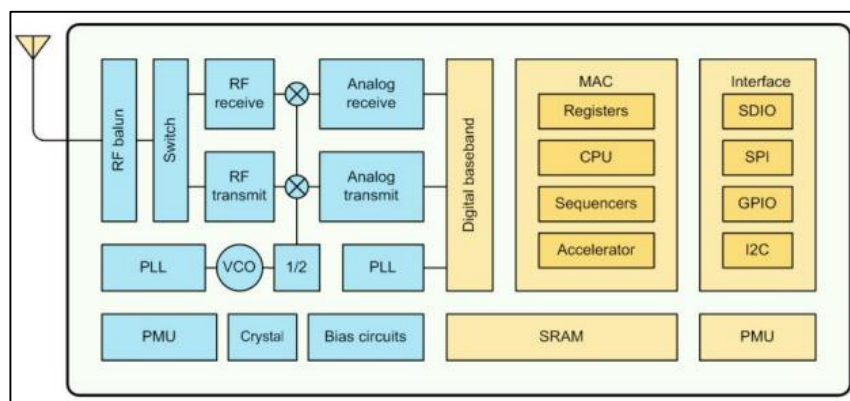
Hardware mikrokontroler Kinetis K66 ditunjukkan pada Gambar 2.13.



Gambar 2. 13 Mikrokontroler Kinetis K66 (PJRC, 2020)

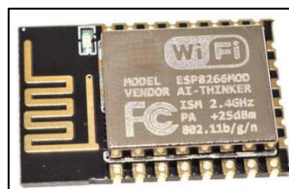
2.7.2 ESP8266

ESP8266 merupakan mikrokontroler berbasis 32-bit yang dilengkapi dengan modul *wireless* 2.4 Ghz (MicrochipUA, 2015). Pada penelitian ini ESP8266 berfungsi sebagai mikrokontroler *master* yang akan melakukan komunikasi data dengan sistem *plant* secara *wireless*. Mikrokontroler ini juga berfungsi sebagai media *transfer* data dari sistem lokal menuju ke *database server* di *host* internet serta mengirim data ke sistem HMI. Arsitektur ESP8266 ditunjukkan pada Gambar 2.14.



Gambar 2. 14 Arsitektur ESP8266 (MicrochipUA, 2015).

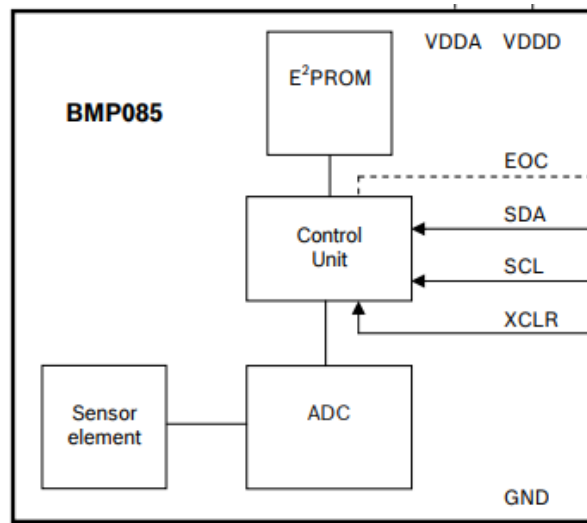
Hardware ESP8266 ditunjukkan oleh Gambar 2.15



Gambar 2. 15 Hardware ESP8266 (MicrochipUA, 2015)

2.8 Sensor Tekanan Udara

Sensor tekanan udara merupakan sensor yang secara langsung dapat mengukur tekanan di udara berdasarkan perubahan ketinggian atau berdasarkan perubahan tekanan dari suatu sistem. Dalam penelitian ini, untuk mengukur perubahan ketinggian air dan minyak digunakan sensor tekanan udara BMP085 dengan range pengukuran 300 – 1100 hPa dengan resolusi pengukuran 0.03 hPa. Arsitektur BMP085 ditunjukkan pada Gambar 2.16.



Gambar 2. 16 Arsitektur BMP085 (Sensortec, 2011)

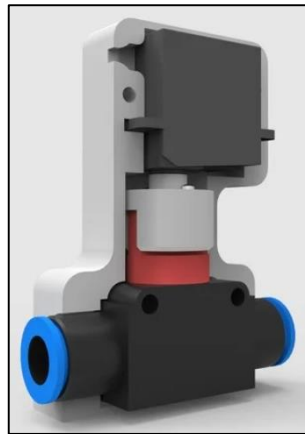
Hardware BMP085 ditunjukkan pada Gambar 2.17.



Gambar 2. 17 *Hardware* BMP085 (Sensortec, 2011)

2.9 Aktuator Servo Valve

Servo motor adalah DC motor yang dilengkapi dengan *feedback circuits* sehingga posisi sudut *shaft* dapat dikendalikan secara akurat. Motor mempunyai 3 terminal yaitu: *power*, *ground*, dan kontrol. Terminal kontrol dikendalikan dengan sinyal *pulse width modulation* (PWM). Pada penelitian ini putaran dari servo motor digunakan untuk menggerakkan valve dengan kecepatan putar $0.17\text{s}/60^\circ$ (Ibrahim, 2019).



Gambar 2. 18 Servo valve (DonVito, 2016)

2.10 Modul komunikasi *wireless* 2.4 Ghz

Modul komunikasi *wireless* yang digunakan dalam penelitian ini adalah Zigbee Modules (802.15.4) dengan frekuensi radio 2.4 Ghz. Spesifikasi dari modul komunikasi *wireless* ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Spesifikasi Zigbee modules (Digi, 2018)

Frekuensi	2.4 Ghz
Range	2 mile
Data Rate	250 kb/s
Sensitivity	-101 dBm
Operating Voltage	2.7 – 3.6 V
Output Power	63 mW
Protocol	802.15.4 (ANT, Thread, Zigbee)

Modul Komunikasi zigbee merupakan perangkat yang berfungsi sebagai protokol komunikasi *wireless*. Modul ini cocok diterapkan pada sistem komunikasi wsn dan tergolong harga yang relatif murah. Modul yang bekerja pada frekuensi 2.4 Ghz ini dapat bekerja pada jarak tertentu tergantung lingkungannya, *indoor atau outdoor*. Protokol komunikasi zigbee disiapkan untuk aplikasi yang memerlukan kecepatan data dan konsumsi daya yang rendah. *Hardware Zigbee 802.15.4* ditunjukkan pada Gambar 2.19

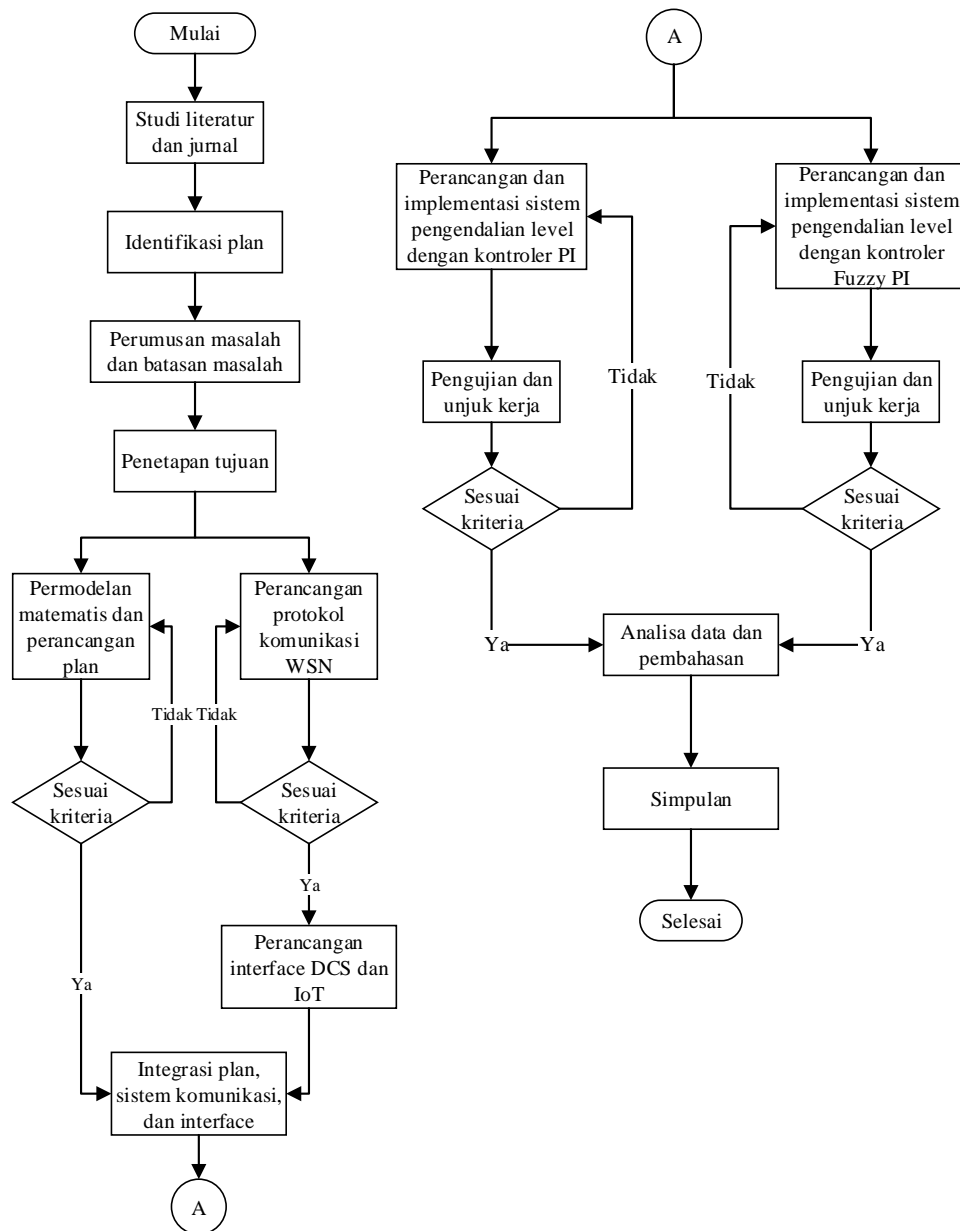


Gambar 2. 19 Hardware Zigbee 802.15.4 (Digi, 2018)

Modul ini mempunyai 20 pin dengan fungsi yang berbeda setiap pin nya. Untuk spesifikasi minimum dibutuhkan pin VCC, GND, TX, dan RX. Sedangkan untuk sistem komunikasi yang lebih kompleks, dibutuhkan pin VCC, GND, TX, RX, RTS, dan DTR. VCC dan GND untuk tegangan *input*, TX merupakan pin *transmitter* (TX), dan RX merupakan pin *receiver* (RX). Untuk dapat mengoperasikan modul ini dibutuhkan *supply* tegangan sebesar 3.3 V. Zigbee merupakan modul *transceiver*, dengan mekanisme pengiriman data secara *serial*. Pin untuk mengirim dan menerima data ada di pin 2 sebagai pin pengirim (Tx) dan pin 3 sebagai pin penerima (Rx). Pengaturan parameter serta upgrade *firmware* pada modul ini dapat dilakukan dengan *software* XCTU .

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini dibahas mengenai metodologi penelitian yang digunakan berupa pemodelan matematis dan perancangan plan, perancangan protokol WSN, perancangan *interface monitoring*, dan perancangan sistem pengendalian pada plan. Diagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian Studi Literatur dan Jurnal

Sebelum dilakukan sebuah penelitian perlu dilakukan pencarian informasi dan fakta-fakta terkait yang menunjang bahwa sebuah penelitian dapat dilakukan. Studi literatur yang dilakukan pada penelitian “Rancang Bangun Sistem Pengendalian Fuzzy PI Pada *Mini Plant* Separator Tiga Fasa menggunakan *Interface DCS* berbasis *Wireless Sensor Network* dan *Iot* secara *Real-time*” dapat berupa jurnal, buku, dan informasi lainnya mengenai penelitian serupa atau dasar informasi dari komponen dari kelengkapan yang digunakan.

3.1 Identifikasi Plan

Berdasarkan Gambar 3.1, separator mempunyai *input* dari sumur pengeboran berupa minyak, gas, dan air. *Input* tersebut kemudian dipisahkan fasanya berdasarkan perbedaan masa jenis. Separator mempunyai 2 *compartment* (ruangan) dengan *wier* (pemisah). Ruangan pertama berisi air dan minyak. Ruangan kedua hanya berisi minyak yang telah tumpah karena melebihi tinggi *wier*. Spesifikasi ukuran separator ditunjukkan pada tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Dimensi Separator (PERTAMINA EP, 2017)

DIMENSI	NILAI
Panjang total	6401 mm
Panjang ruangan 1	5781 mm
Diameter	2438 mm
Tinggi <i>wier</i>	2184 mm
<i>Nozzle</i> pipa <i>inlet</i>	222 mm
<i>Nozzle</i> pipa <i>outlet</i> air	187 mm
<i>Nozzle</i> pipa <i>outlet</i> minyak	77 mm
<i>Nozzle</i> pipa <i>outlet</i> gas	50 mm

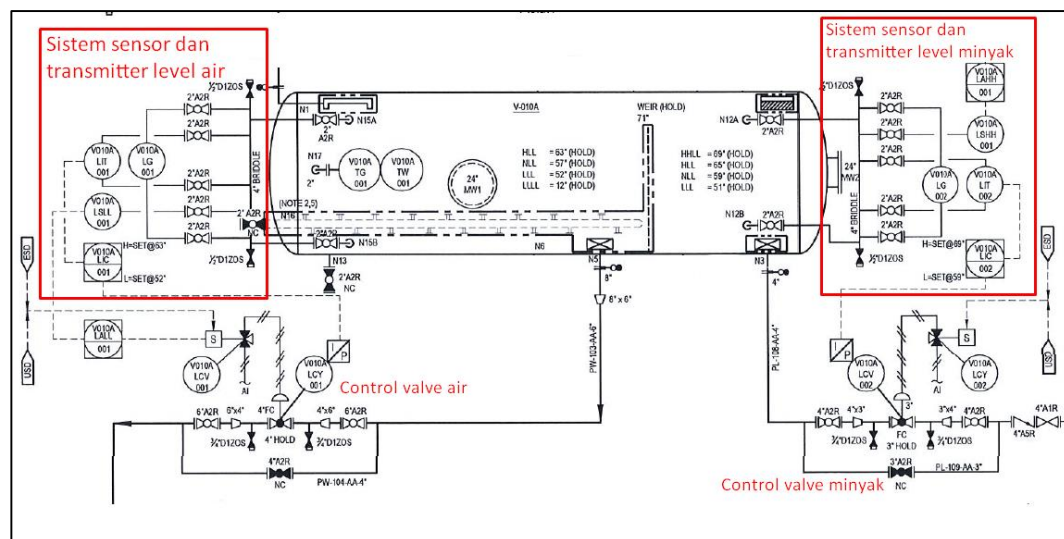
Data parameter proses separator ditunjukkan pada tabel 3.2.

Tabel 3. 2 Data parameter proses (PERTAMINA EP, 2017)

PARAMETER PROSES	NILAI
Q_{in}	121.63 m ³ /hr

Q_{om}	16.55 m ³ /hr
Q_{oa}	99.29 m ³ /hr
Tekanan	50 psig
Temperature	122°F
Masa jenis minyak	57.05 lb/ft ³
Massa jenis air	63.65 lb/ft ³

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2, *plant* mempunyai *transmitter level* air, *transmitter level* minyak, *control vavle* air, dan *control valve* minyak. Komponen yang ditunjuk pada Gambar 3.2 akan dijadikan acuan dalam pembuatan mini *plant* dalam penelitian ini.



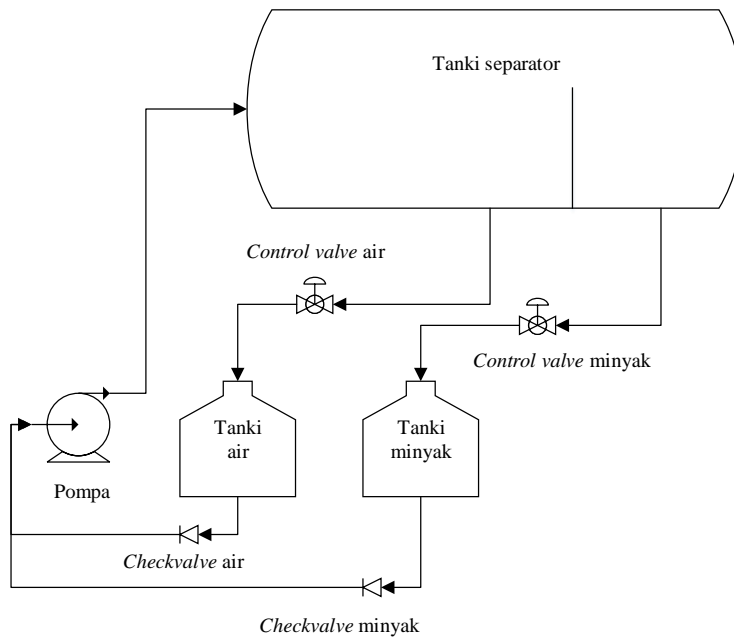
Gambar 3. 2 P&ID Separator 3 Fasa (PERTAMINA EP, 2017)

3.2 Perancangan *mini plant*

Berdasarkan referensi sebelumnya, dilakukan proses perancangan *mini plant*. Proses perancangan meliputi perancangan mekanik dan perancangan elektrik.

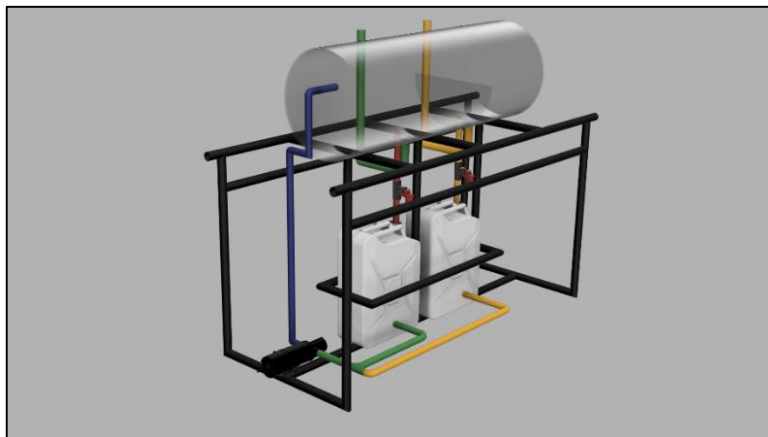
3.2.1 Perancangan mekanik

Mini plant dirancang dengan perbandingan skala sekitar 1 : 8 dari *plant* referensi. Skema alat secara umum ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3. 3 Skema separator

Selanjutnya dilakukan proses menggambar *miniplant* untuk mempermudah dalam perancangan *hardware*. Rancangan *miniplant* ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3. 4 Rancangan *miniplant*

Tahap selanjutnya dilakukan perancangan *hardware* dengan spesifikasi dimensi ditunjukkan pada tabel 3. 3

Tabel 3. 3 Dimensi *miniplant*

DIMENSI	NILAI
Panjang total	800 mm

Panjang ruangan 1	590 mm
Diameter	300 mm
Tinggi Wier	150 mm
Nozzle pipa inlet	18 mm
Nozzle pipa outlet air	16 mm
Nozzle pipa inlet minyak	16 mm

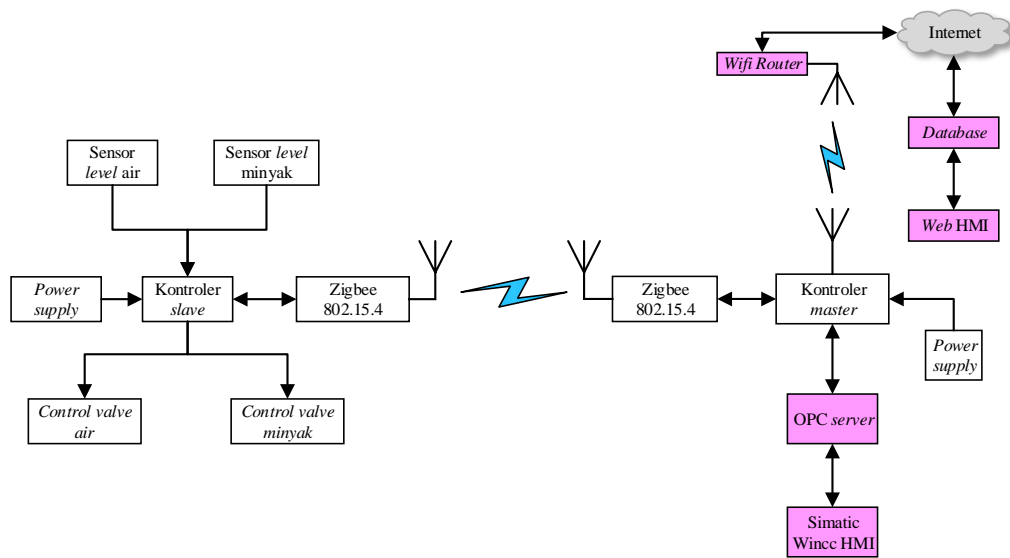
Hasil realisasi perancangan miniplant ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 *Miniplant separator*

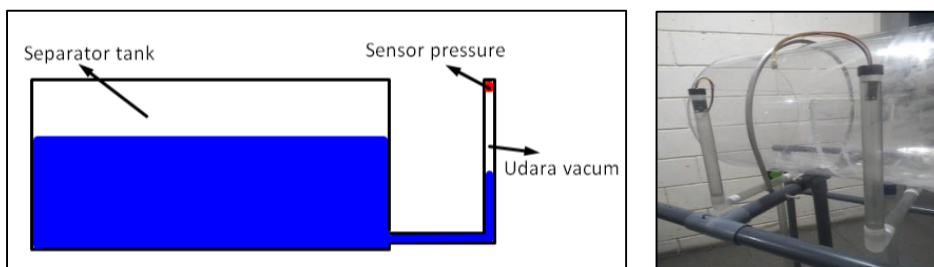
3.2.2 Perancangan elektrik

Sistem elektrik pada sistem mempunyai 2 kontroler, yaitu kontroler *slave* dan kontroler *master*. Kontroler *slave* terhubung dengan sistem sensor, sistem aktuator, sistem komunikasi *wireless*, dan *power supply*. Sedangkan pada kontroler *master* terhubung dengan sistem komunikasi *wireless* dan *power supply*. Diagram sistem elektrik ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3. 6 Skema sistem elektrik

Pada bagian sensor level, sensor dipasang secara vacuum, sehingga udara yang terjebak pada pipa sensor dapat dimanfaatkan untuk membaca ketinggian cairan yang berada di dalam tanki. Semakin tinggi cairan yang berada dalam tanki, semakin tinggi juga tekanan yang dihasilkan oleh udara yang terjebak. Metode pengukuran ini dipilih karena dengan spesifikasi sensor yang digunakan dapat membaca perubahan ketinggian cairan 0.1 mm. Berdasarkan pengujian, dari range ketinggian 0 -0.15 m menghasilkan tekanan diferensial dengan atmosfer sebesar 0-3000 Pa. Nilai tekanan ini akan dirubah ke dalam tegangan 0-5 Volt untuk input aktuator. Gambar 3.7 menunjukkan skema dan realisasi dari pemasangan sensor.



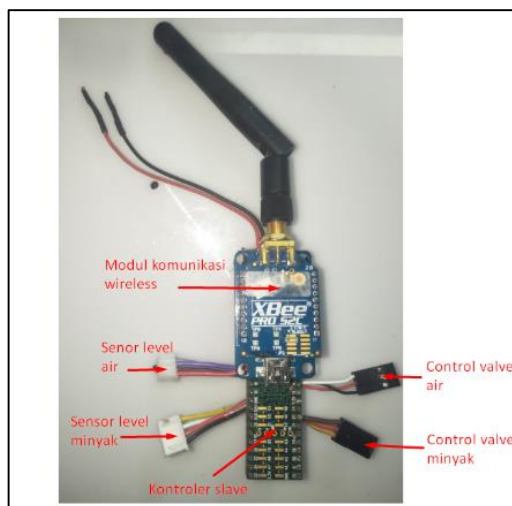
Gambar 3. 7 Skema dan realisasi sensor tekanan

Setelah sensor terpasang, selanjutnya dilakukan pemasangan *control valve*. Terdapat dua *control valve* dalam mini plant ini, yaitu *control valve* untuk *output* air dan *control valve* untuk *output* minyak seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.8. Secara sederhana, *control valve* akan membuka penuh ketika *level* cairan berada pada batas atas dan menutup penuh ketika berada *level* cairan berada pada batas bawah.



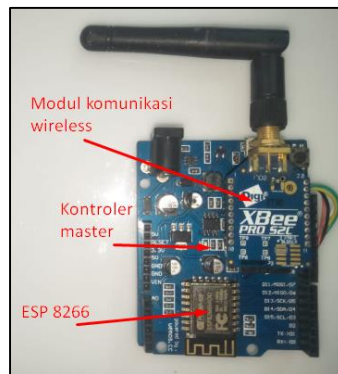
Gambar 3. 8 Pemasangan *control valve*

Proses selanjutnya adalah perancangan *kontroler slave*. Realisasi rangkain *kontroler slave* ditunjukkan pada Gambar 3.9. Semua sistem komputasi termasuk kontroler PI, kontroler fuzzy PI, serta proses akuisi data dilakukan pada kontroler slave.



Gambar 3. 9 Rangkain kontroler *slave*

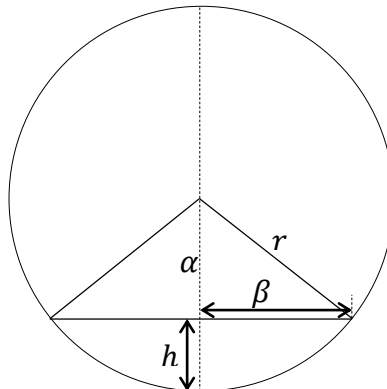
Pada kontroler *master*, semua data yang dikirim dari kontroler *slave* akan dilanjutkan ke sistem *monitoring* DCS dan IoT. Dengan adanya *third party* OPC, protokol komunikasi *serial* akan dirubah menjadi protokol komunikasi OPC. Rangkain kontroler master ditunjukkan pada Gambar 3.10.



Gambar 3. 10 Kontroler *master*

3.3 Pemodelan Matematis

Analisa pemodelan pada separator didasarkan pada bentuk geometri dari *miniplant*, serta analisa *mass balance*. Gambar 3.11 adalah bagian separator berupa irisan atau *cross-section*. Perubahan ketinggian permukaan cairan dapat dihitung menggunakan teorema *pythagoras* dengan r adalah jari-jari separator atau sisi miring segitiga, β merupakan setengah dari lebar permukaan cairan, h adalah tinggi cairan, dan α adalah selisih antara jari-jari dan tinggi cairan (Wilhelmsen, 2013).



Gambar 3. 11 *Cross section* dari separator

Lebar cairan separator dapat dihitung dengan persamaan 3.1.

$$\begin{aligned} r^2 &= \alpha^2 + \beta^2 \\ \beta^2 &= r^2 - \alpha^2 \\ \beta &= \sqrt{r^2 - \alpha^2} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Pada persamaan 3.1 α diganti dengan $r - h$ supaya β menjadi fungsi dari h , sehingga menjadi persamaan 3.2.

$$\begin{aligned} \beta(h) &= \sqrt{r^2 - (r - h)^2} \\ \beta(h) &= \sqrt{2rh - h^2} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Dengan melakukan penjumlahan β dari $h = 0$ sampai h pada tinggi cairan maka didapatkan luasan dari *cross-section*. Persamaan luasan *cross-section* ditunjukkan pada persamaan 3.3.

$$\begin{aligned} A(h) &= 2 \cdot \int_0^h \sqrt{2rh - h'^2} dh' \\ A(h) &= 2 \cdot \int_0^h \beta(h') dh' \end{aligned} \quad (3.3)$$

Untuk menghitung *volume* cairan, luasan *cross section* yang telah didapatkan pada persamaan 3.3 dikalikan dengan panjang separator. Persamaan *volume* cairan ditunjukkan pada persamaan 3.4.

$$\begin{aligned} V(h) &= 2l \cdot \int_0^h \beta(h') dh' \\ \frac{dV}{dt} &= \frac{d}{dt} (2l \cdot \int_0^h \beta(h') dh') \\ \frac{dV}{dt} &= 2l \cdot \frac{\delta}{\delta h} \int_0^h \beta(h') dh' \cdot \frac{\delta h}{\delta t} \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\frac{dV}{dt} = 2l \cdot (\beta(h) - \beta(0)) \cdot \frac{\delta h}{\delta t}$$

3.3.1 Pemodelan Tinggi Air

Pemodelan tinggi air dilakukan melalui pendekatan persamaan aliran volume pada ruangan 1 dari separator. Persamaan aliran volume ditunjukkan pada Persamaan 3.5 dengan $q_{iw}(t)$ adalah laju aliran air yang masuk, $q_{ow}(t)$ adalah laju aliran air yang keluar yang selanjutnya $q_{iw}(t) - q_{ow}(t)$ disebut $q_w(t)$.

$$\frac{dV_w}{dt} = q_{iw}(t) - q_{ow}(t) \quad (3.5)$$

$$\frac{\delta}{\delta h_w} \left(2l_w \cdot \int_0^{h_w} \beta(h') dh' \right) \cdot \frac{dV_w}{dt} = q_{iw}(t) - q_{ow}(t)$$

$$\frac{dh_w}{dt} = \frac{1}{\frac{\delta}{\delta h_w} \left(2l_w \cdot \int_0^{h_w} \beta(h') dh' \right)} \cdot q_w(t)$$

$$\frac{dh_w}{dt} = \frac{1}{2l_w (\beta(h) - \beta(0))} \cdot q_w(t) \quad (3.6)$$

Persamaan 3.6 menunjukkan perubahan tinggi air terhadap waktu. Untuk analisa lebih lanjut, persamaan 3.6 dirubah menjadi domain frekuensi yang ditunjukkan pada persamaan 3.7. Karena model tinggi air bersifat nonlinear, maka model tersebut dilinearakan dengan menetapkan tinggi air di daerah *set point* yang selanjutnya disebut $q_{w_{sp}}$. Linearisasi dilakukan untuk mendapatkan fungsi transfer seperti yang ditunjukkan pada persamaan 3.8.

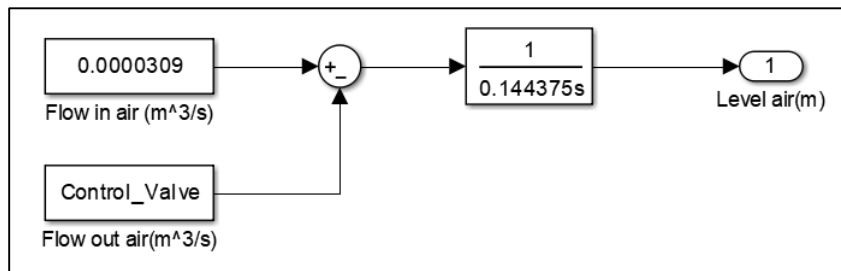
$$\mathcal{L} \left\{ \frac{dh_w}{dt} \right\} = \mathcal{L} \left\{ \frac{1}{2l_w \cdot \beta_w(h_{w_{sp}})} (q_w(t)) \right\} \quad (3.7)$$

$$s h_w(s) = \frac{q_w(s)}{2l_w \cdot \beta_w(h_{w_{sp}})}$$

$$h_w(s) = \frac{q_w(s)}{2l_w \cdot \beta_w(h_{w_{sp}}) s}$$

$$\frac{h_w(s)}{q_w(s)} = \frac{1}{2l_w \cdot \beta_w(h_{w_{sp}})s} \quad (3.8)$$

Pada penelitian ini $h_{w_{sp}}$ ditetapkan dengan nilai 0.075 m. *Mass flow rate* total pada inlet sebesar 0.000516667 m³/s. *Mass flow rate* air adalah 60% dari total *mass flow rate* fluida pada inlet yaitu 0.0000309 m³/s. Pemodelan matematis perubahan tinggi air ditunjukkan pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12 Model matematis tinggi air

3.3.2 Pemodelan Tinggi Minyak

Pemodelan tinggi minyak dilakukan melalui pendekatan persamaan aliran volume pada ruangan 2 separator. Persamaan aliran volume ditunjukkan pada Persamaan 3.9 dengan $q_{io}(t)$ adalah laju aliran minyak yang masuk, $q_{oo}(t)$ adalah laju aliran minyak yang keluar yang selanjutnya $q_{io}(t) - q_{oo}(t)$ disebut $q_o(t)$.

$$\frac{dV_w}{dt} = q_{io}(t) - q_{oo}(t) \quad (3.9)$$

$$\frac{\delta}{\delta h_o} \left(2l_o \cdot \int_0^{h_o} \beta(h') dh' \right) \cdot \frac{dV_o}{dt} = q_{io}(t) - q_{oo}(t)$$

$$\frac{dh_o}{dt} = \frac{1}{\frac{\delta}{\delta h_w} \left(2l_o \cdot \int_0^{h_o} \beta(h') dh' \right)} \cdot q_w(t)$$

$$\frac{dh_o}{dt} = \frac{1}{2l_o(\beta(h) - \beta(0))} \cdot q_o(t) \quad (3.10)$$

Persamaan 3.10 menunjukkan perubahan tinggi minyak terhadap waktu. Untuk analisa lebih lanjut, persamaan 3.10 dirubah menjadi domain frekuensi yang ditunjukkan pada persamaan 3.11. Karena model tinggi minyak bersifat nonlinear,

maka model tersebut dilinearkan dengan menetapkan tinggi air di daerah *set point* yang selanjutnya disebut $q_{o_{sp}}$ (Wilhelmsen, 2013). Linearisasi dilakukan untuk mendapatkan fungsi transfer seperti yang ditunjukkan pada persamaan 3.12.

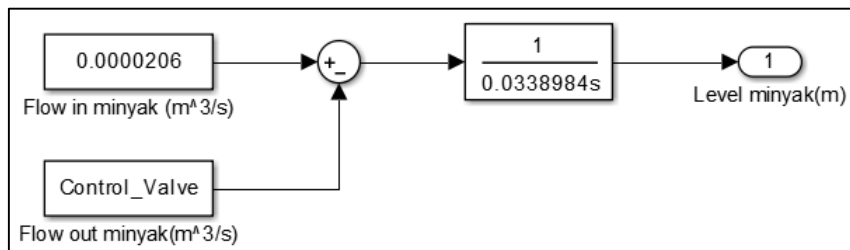
$$\mathcal{L}\left\{\frac{dh_o}{dt}\right\} = \mathcal{L}\left\{\frac{1}{2l_o \cdot \beta_o(h_{o_{sp}})}(q_o(t))\right\} \quad (3.11)$$

$$sh_o(s) = \frac{q_o(s)}{2l_o \cdot \beta_o(h_{o_{sp}})}$$

$$h_o(s) = \frac{q_o(s)}{2l_o \cdot \beta_o(h_{o_{sp}})s}$$

$$\frac{h_o(s)}{q_o(s)} = \frac{1}{2l_o \cdot \beta_o(h_{o_{sp}})s} \quad (3.12)$$

Pada penelitian ini $h_{o_{sp}}$ ditetapkan dengan nilai 0.075 m. *Mass flow rate* total pada inlet sebesar 0.000516667 m³/s. *Mass flow rate* minyak adalah 40% dari total *mass flow rate* fluida pada inlet yaitu 0.0000206 m³/s. Pemodelan matematis perubahan tinggi air ditunjukkan pada Gambar 3.13.



Gambar 3. 13 Model matematis tinggi minyak

3.3.3 Pemodelan Aktuator

Aktuator yang digunakan pada plant bersifat linear, sehingga persamaan orde satu dapat digunakan untuk pemodelan matematis. Persamaan tersebut ditunjukkan pada persamaan 3.13.

$$\frac{q(s)}{U(s)} = \frac{K}{T_s + 1} \quad (3.13)$$

Dengan

$q(s)$ = laju cairan (m^3/s)

$U(s)$ = sinyal *input* aktuator (V)

K = *gain* aktuator

T_s = *time constant* aktuator (s)

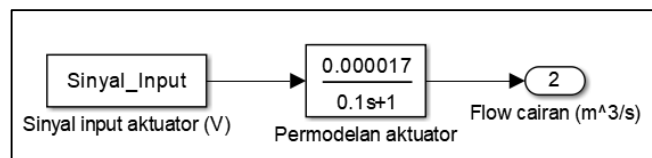
$$K = \frac{(0.0000833-0)\text{m}^3/\text{s}}{(5-0)\text{V}}$$

$$= 0.000017$$

Berdasarkan *dataseheet* aktuator, *time constant* bernilai 0.1s, sehingga pemodelan aktuator didapatkan sebagai berikut :

$$\frac{q(s)}{U(s)} = \frac{0.000017}{0.1s + 1}$$

Pemodelan aktuator ditunjukkan pada Gambar 3.14



Gambar 3. 14 Model aktuator

3.3.4 Pemodelan Sensor

Sensor dapat membaca ketinggian cairan dengan range 0 – 0.5 m dengan sinyal keluaran 0 – 5 V. Persamaan untuk model sensor ditunjukkan pada persamaan 3.14.

$$\frac{U(s)}{h(s)} = \frac{K}{T_s + 1} \quad (3.14)$$

Dengan

$U(s)$ = sinyal *output* sensor (V)

$h(s)$ = tinggi cairan (m)

K = gain sensor

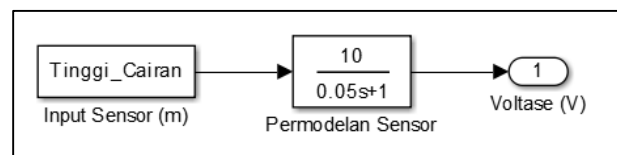
T_s = time constant sensor (s)

$$K = \frac{(5-0)V}{(0.5-0)m}$$

Berdasarkan *dataseheet* sensor, *time constant* bernilai 0.05s, sehingga pemodelan sensor didapatkan sebagai berikut :

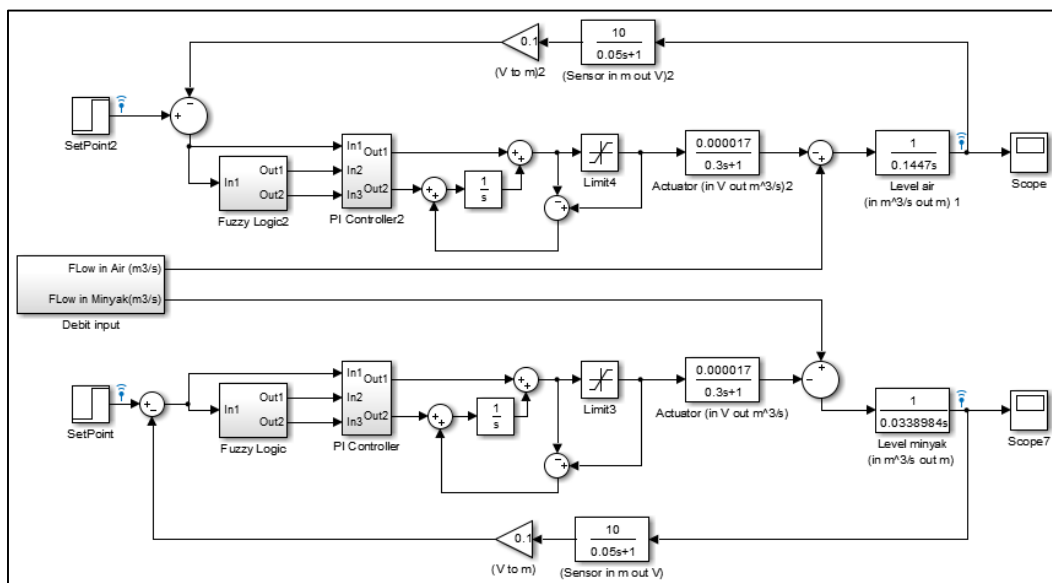
$$\frac{U(s)}{h(s)} = \frac{10}{0.05s + 1}$$

Pemodelan sensor ditunjukkan pada Gambar 3.15



Gambar 3. 15 Model sensor

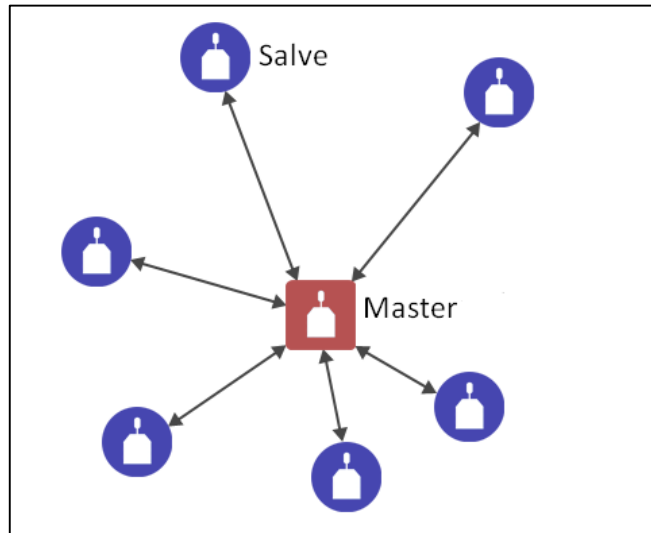
Setelah semua sistem telah dimodelkan, selanjutnya dilakukan Integrasi dari setiap sistem seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.16



Gambar 3. 16 Integrasi model

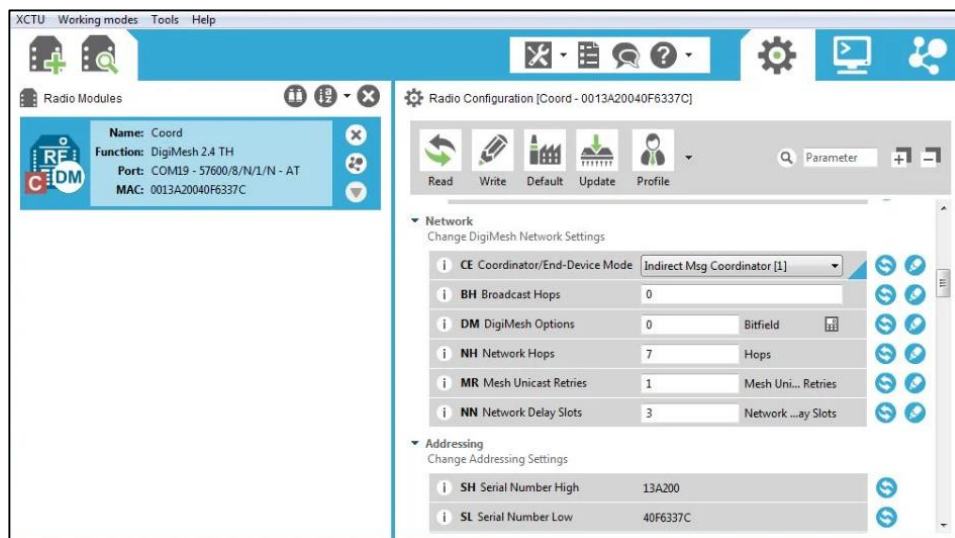
3.4 Perancangan Protokol Komunikasi WSN

Protokol komunikasi dirancang menggunakan topologi *star* dengan komunikasi dua arah. Komunikasi ini menggunakan sistem *serial* dengan *baudrate* 9600, *data bits* 8, dan *stop bits* 1. Gambar 3.17 menunjukkan sistem topologi yang digunakan dalam *plant*.



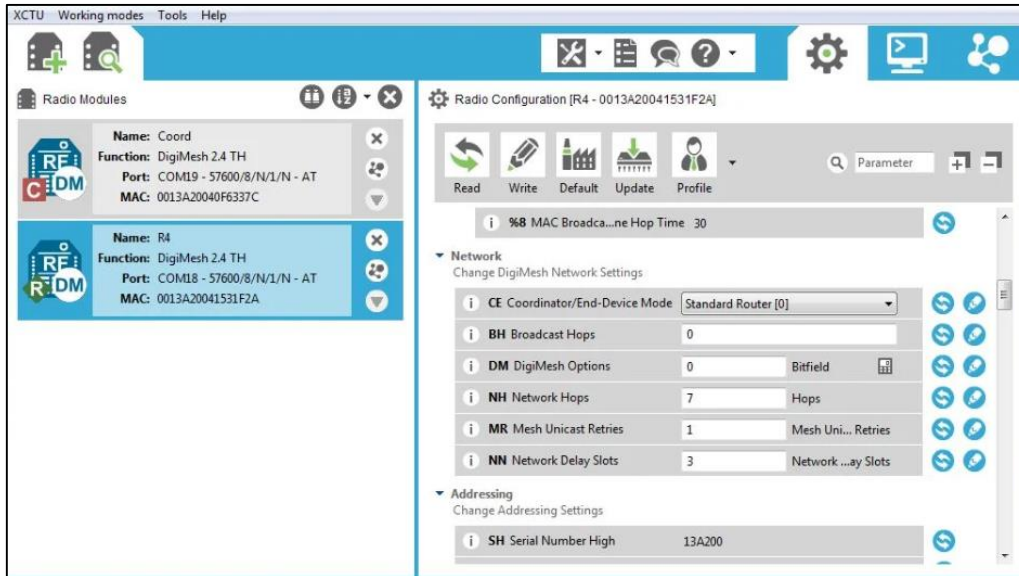
Gambar 3. 17 Topologi *star* (Digi, 2018)

Konfigurasi perangkat sebagai *master* ditunjukkan pada Gambar 3.18



Gambar 3. 18 Konfigurasi perangkat *master*

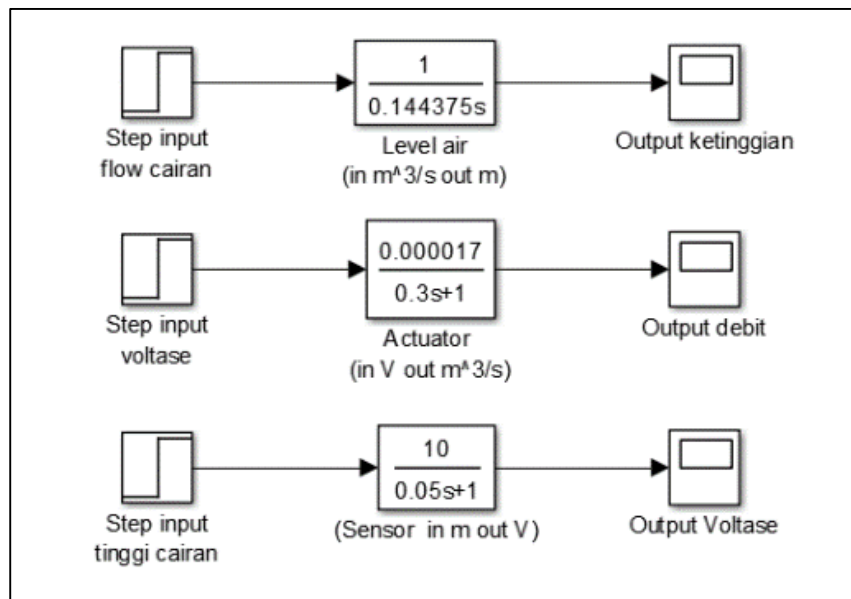
Pada perangkat *slave*, konfigurasi disesuaikan dengan perangkat *master* seperti *baudrate*, *channel*, *network*, dan *addressing*. Konfigurasi perangkat sebagai *slave* ditunjukkan pada Gambar 3.19



Gambar 3. 19 Konfigurasi perangkat *slave*

3.5 Pengujian Pemodelan Matematis

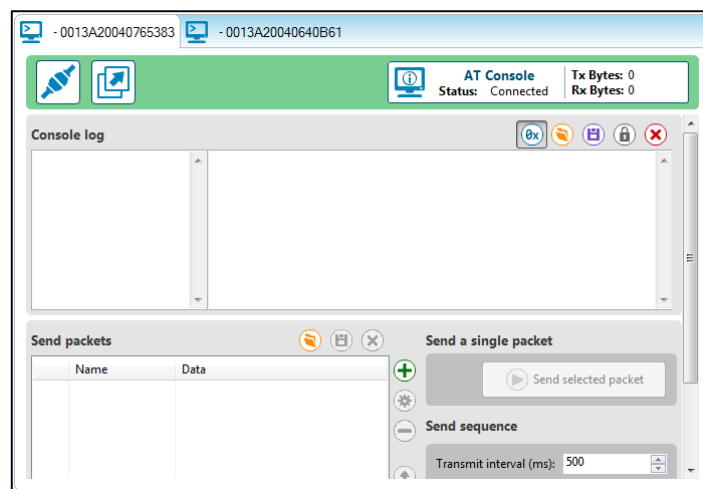
Pengujian dilakukan pada setiap pemodelan yang telah dirancang sebelumnya, meliputi uji *input output* dan uji dengan *step input*. Pada pemodelan *level* dilakukan uji dengan memberi masukan *flow* secara konstan. Karena separator berbentuk setengah silinder, maka *volume* yang telah terisi dapat divalidasi dengan perhitungan volume setengah silinder. Pengujian ini dilakukan untuk memastikan bahwa pemodelan *level* sudah tepat. Uji pemodelan aktuator dilakukan dengan memberi *input step* berupa tegangan, sedangkan uji pemodelan sensor dilakukan dengan memberikan variasi *input step* tinggi cairan. Pengujian setiap sistem ditunjukkan pada Gambar 3.20.



Gambar 3. 20 Pengujian pemodelan matematis

3.6 Pengujian Protokol Komunikasi WSN

Untuk memastikan perangkat *master* dan *slave* dapat berkomunikasi, dilakukan pengujian dengan mengirim paket data acak secara bergantian antara perangkat *master* dan *slave* dengan metode data *serial*. Pengujian komunikasi ditunjukkan pada Gambar 3.21.



Gambar 3. 21 Pengujian protokol komunikasi WSN

Pengujian protokol komunikasi didasarkan pada standar International Telecommunication Union (ITU) G.114 dimana parameter yang diuji adalah *delay time* dari pengiriman data. *Delay* yang direkomendasikan dalam proses pengiriman data harus kurang dari 150 ms (ITU, 2003). Format data dalam sistem komunikasi yang digunakan adalah bertipe *string* dengan besar 29 *bytes* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.22.

Size (bytes)	[1]	[6]	[1]	[6]	[1]	[6]	[1]	[6]	[1]
Data	*	0.1000		0.0524		0.1000		0.0078	#
Keterangan	<Data Header>	<SP Air>	<Separator>	<Lv Air>	<Separator>	<SP Minyak>	<Separator>	<Level minyak>	<Data Footer>
Unit	-	m	-	m	-	m	-	m	-

Gambar 3. 22 Format data sistem komunikasi

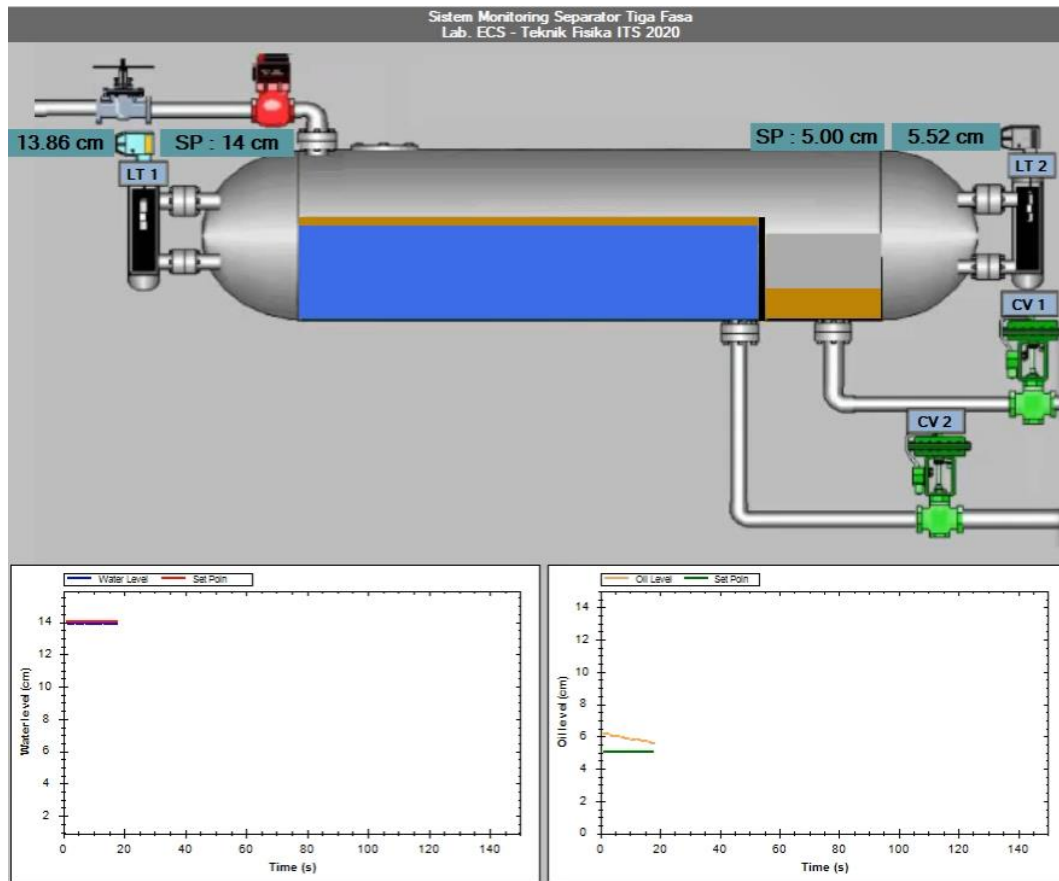
3.7 Perancangan *interface* DCS dan IoT

Perancangan *interface* diperlukan untuk memudahkan dalam proses *monitoring plant*. Perancangan *interface* pada *plant* ini menggunakan *platform* DCS Siemens Simatic Wincc serta *platform* IoT dengan *database* di *server hosting*.

3.7.1 Perancangan *interface* DCS

Pada perancangan ini supaya mikrokontroler *master* dapat berkomunikasi dengan *platform* DCS maka digunakan *third-party* berupa OPC server. OPC server seolah olah menggantikan mikrokontroler dengan modbus RTU atau perangkat sejenisnya dengan merubah dari komunikasi serial menjadi protokol komunikasi DCS. Perubahan ini meliputi pin pada kontroler *master* juga, sehingga pin pin *digital* dan *analog* pada kontroler master akan menjadi sistem *tag number* yang mirip dengan perangkat RTU atau PLC. Langkah selanjutnya adalah menguji dan mendesain tampilan monitoring dari *mini plant*. Uji yang dilakukan adalah membuat data dari kontroler master yang kemudian dibaca oleh DCS, pada tahap ini diperhatikan kecocokan data yang dikirim oleh kontroler *master* dan yang diterima oleh DCS harus dipastikan sama. Data dari kontroler master sudah dapat terbaca dengan benar oleh DCS, selanjutnya dilakukan proses pembuatan *interface* pada Wincc. Proses pembuatan *interface* menggunakan toolbox standar yang telah disediakan oleh Wincc, *toolbox* yang digunakan adalah *horizontal tank*, standar

pipe, serta *control valve*. Interface DCS yang telah dirancang ditunjukkan pada Gambar 3.23.



Gambar 3. 23 *Interface DCS*

3.7.2 Perancangan sistem IoT

Perancangan sistem IoT bertujuan untuk memudahkan dalam memantau variabel pada *plant*. Perancangan ini dilakukan dengan beberapa tahap diantaranya pembuatan *gateway* komunikasi dari mikrokontroler ke sistem internet, pembuatan *database*, dan pembuatan penampil data. Sistem ini memanfaatkan teknologi *hosting* sebagai media penyimpanan dan penampil data. Data yang telah sukses tersimpan di *database* dapat ditampilkan oleh semua perangkat yang mendukung *webbase*. Perancangan sistem IoT ditunjukkan pada Gambar 3.24.

DTIME	SP1	SENSOR1	SP2	SENSOR2
2020-06-23 21:51:56	0	0	0	0
2020-06-23 21:58:16	14.00	13.53	6.00	3.12
2020-06-23 21:58:37	14.00	13.57	6.00	3.38
2020-06-23 21:58:53	14.00	13.59	6.00	3.84
2020-06-23 21:59:12	14.00	13.62	6.00	4.07
2020-06-23 21:59:30	14.00	13.66	6.00	4.26
2020-06-23 21:59:55	14.00	13.62	6.00	4.45
2020-06-23 22:00:41	14.00	13.62	6.00	4.45
2020-06-23 22:00:41	14.00	13.69	6.00	4.51
2020-06-23 22:00:41	14.00	13.58	6.00	4.49

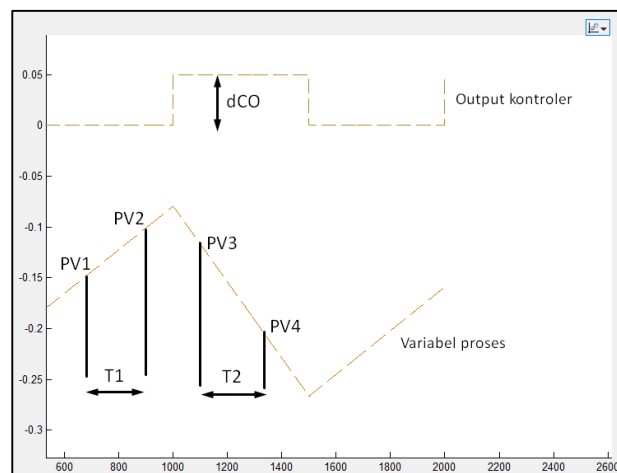
Gambar 3. 24 Sistem IoT

3.8 Integrasi *Plant*, Sistem Komunikasi, dan *Interface*

Pada tahap ini, dilakukan penggabungan anatar *software* dan *hardware* sehingga *plant* sudah dapat beroperasi dan dapat dilanjutkan dengan tahap perancangan sistem kontrol.

3.9 Perancangan dan Implementasi menggunakan Kontroler PI

Berdasarkan referensi yang telah dipelajari sebelumnya serta dari hasil uji step dari pemodelan *level*, *plant* mempunyai karakteristik *self integrating process* yang artinya *plant* tidak mempunyai titik stabil pada setiap kondisi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.25 dengan sumbu y adalah ketinggian dan sumbu x adalah waktu.



Gambar 3. 25 Step respon sistem

Dengan *step* respon tersebut, metode tuning pada umumnya seperti ziegler nichols tidak dapat digunakan. Proses *tunning* kontroler digunakan dengan metode pendekatan gain dan hubungan antara gradien PV1 dan PV2 terhadap besar perubahan output kontroler (ControlEngineering, 2020). Perhitungan Kp dan Ti ditunjukkan pada persamaan 3.15 dan 3.16.

$$Ds = \frac{(PV4 - PV3)}{T2} - \frac{(PV2 - PV1)}{T1}$$

$$Ds\% = \frac{100 \times Ds}{(PV \text{ range max} - PV \text{ range min})}$$

$$ri = \frac{Ds\%}{dCO\%}$$

$$Kp = \frac{0.45}{ri \times td} \quad (3.15)$$

$$Ti = 6.67 \times td \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} |Ds| &= \frac{(-0.15 - (-0.1))}{130} - \frac{(-0.1 - (-0.12))}{100} \\ &= 0.0005 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Ds\% &= \frac{100 \times 0.0005}{(0.15 - 0)} \\ &= 0.3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} dCO\% &= \frac{100 \times 5}{(5 - 0)} \\ &= 100 \end{aligned}$$

$$ri = \frac{0.3}{100} = 0.003$$

$$Kp = \frac{0.45}{0.003 \times 0.9}$$

$$= 166.67$$

$$Ti = 6.67 \times 0.9$$

$$= 6.01$$

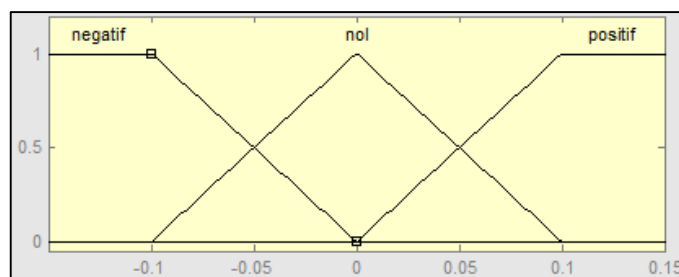
Dengan perhitungan yang telah dilakukan, didapatkan $Kp = 166.67$ dan $Ti = 6.01$ yang selanjutnya akan dilakukan pengujian performansinya dengan memperhatikan kriteria respon dinamik *error steady state* harus dibawah 5% (Ogata, 2010).

3.10 Perancangan dan Implementasi menggunakan Kontroler Fuzzy PI

Pada penelitian ini tipe fuzzy yang digunakan adalah fuzzy sugeno dengan pertimbangan proses komputasi yang tidak memberatkan kontroler. Perancangan kontroler Fuzzy PI dilakukan dengan tiga tahapan, yaitu proses fuzzifikasi, proses penentuan *rule base*, dan proses defuzzifikasi. Kontroler fuzzy PI mempunyai input berupa *error*, serta output berupa Kp dan Ti .

3.10.1 Fuzzifikasi

Error dari sistem mempunyai *range* -0.15 sampai 0.15. Nilai ini akan dipetakan menjadi fungsi keanggotaan yang bernilai 0 sampai 1 dengan fungsi keanggotaan negatif, nol, dan positif. Fungsi keanggotaan yang digunakan adalah segitiga dan trapesium seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.26.



Gambar 3. 26 Fungsi keanggotaan *error*

Persamaan fungsi keanggotaan *error* ditunjukkan pada Persamaan 3.16 sampai 3.18 dibawah ini.

a) Negatif

$$\mu_{Negatif}(x) = \begin{cases} 1; & x \leq -0.1 \\ (0 - x)/(0 - (-0.1)); & -0.1 \leq x \leq 0 \\ 0; & x \geq 0 \end{cases} \quad (3.17)$$

b) Nol

$$\mu_{Nol}(x) = \begin{cases} 0; & x \leq -0.1 \text{ atau } x \geq 0.1 \\ (x - (-0.1))/(0 - (-0.1)); & -0.1 \leq x \leq 0 \\ (0.1 - x)/(0.1 - 0); & 0 \leq x \leq 0.1 \end{cases} \quad (3.17)$$

c) Positif

$$\mu_{Positif}(x) = \begin{cases} 1; & x \geq 0.1 \\ (x - 0)/(0.1 - 0); & 0 \leq x \leq 0.1 \\ 0; & x \leq 0 \end{cases} \quad (3.18)$$

3.10.2 Perancangan rule base

Perancangan *rule base* didasarkan pada karakteristik respon dinamik *plant* seperti yang ditunjukkan pada Lampiran A dan Lampiran B, sehingga basis pengetahuan yang akan digunakan pada parameter Kp dan Ki dapat ditentukan dengan 3 *rule base* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.4

Tabel 3.4 Rule base

<i>if</i> (error is negatif)	<i>then</i> (KP is kpHIGH)and (KI is kiHIGH)
<i>if</i> (error is positif)	<i>then</i> (KP is kpHIGH)and (KI is kiHIGH)
<i>if</i> (error is nol)	<i>then</i> (KP is kpLOW)and (KI is kiLOW)

Rule base yang telah ditentukan akan dieksekusi berdasarkan posisi derajat keanggotan error.

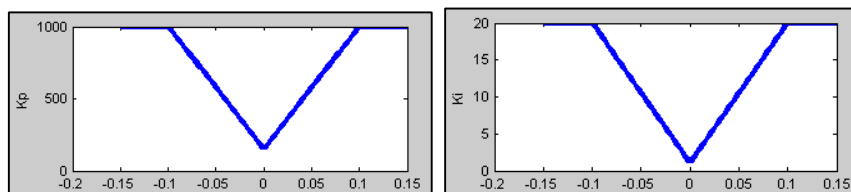
3.10.3 Defuzzifikasi

Proses defuzzifikasi menggunakan metode *weighted average* dari parameter yang dihasilkan pada proses *rule evacuation*. Nilai output Kp dan Ki ditunjukkan pada Tabel 3.5

Tabel 3. 5 Output Kp dan Ki

kpLOW	150
kpMED	500
kpHIGH	1000
kiLOW	1
kiMED	10
kiHIGH	15

Visualiasi output Kp dan Ki ditunjukkan pada Gambar 3.27



Gambar 3. 27 Visualiasi output Kp dan Ki

Pada proses ini akan mengkonversi nilai dari proses perhitungan pada *rule evacuation* dan menghasilkan nilai akhir berupa Kp dan Ki yang siap digunakan pada kontroler PID.

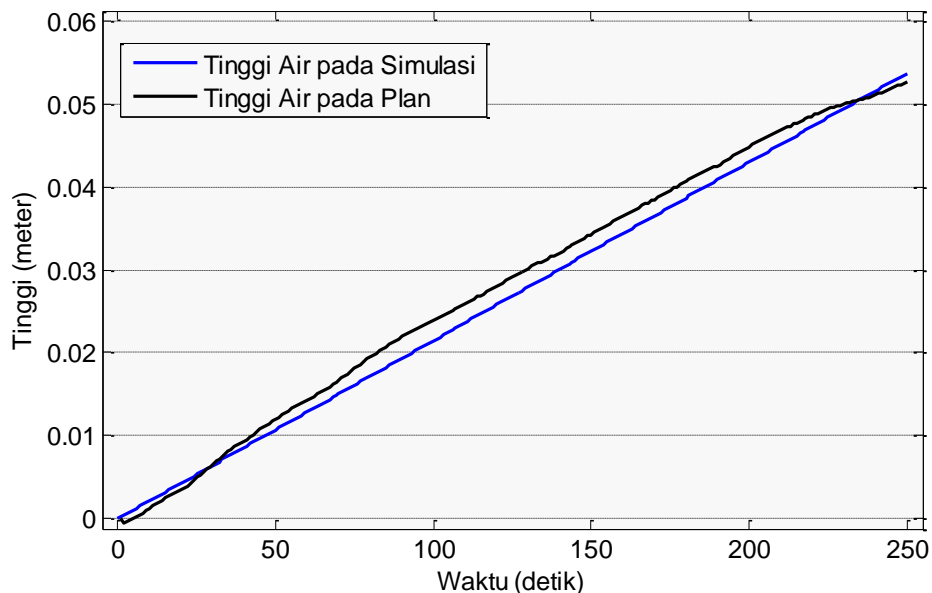
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini menjelaskan tentang pengujian dan analisa dari metode yang telah dilakukan pada bab sebelumnya. Pengujian meliputi verifikasi pemodelan matematis dari *plant*, pengujian protokol komunikasi WSN, pengujian kontroler PI, serta pengujian kontroler fuzzy PI. Sebelum dilakukan implementasi kontroler pada *mini plant*, dilakukan simulasi menggunakan perangkat lunak Matlab.

4.1 Analisa Hasil Uji Pemodelan Matematis

Pengujian pemodelan matematis bertujuan untuk memastikan bahwa pemodelan yang dibuat telah sesuai. Pengujian meliputi uji pada pemodelan level, pemodelan sensor, dan pemodelan aktuator. Pada pemodelan level, dengan input berupa fungsi step menghasilkan kenaikan tinggi cairan secara terus menerus seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1. Hal ini menunjukkan bahwa karakteristik *miniplant* yang *self integrating process*.



Gambar 4. 1 Grafik Respon Level Air

Pengujian yang sama dilakukan pada *miniplant*, dengan memberikan input *step* pada aktuator dan tanpa ada pengaruh dari kontroler. Perbandingan hasil uji input *step* level air pada pemodelan matematis dengan hasil uji pada *miniplant* ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Perbandingan hasil uji *input step* level air

Waktu(s)	Tinggi air simulasi (m)	Tinggi air <i>plant</i> (m)	<i>Error</i>(%)
0	0	0	0
10	0.0021	0.0015	1.27
20	0.0042	0.0037	1.04
30	0.0064	0.0069	0.95
40	0.0085	0.0095	1.98
50	0.0107	0.0122	3.02
60	0.0128	0.0145	3.39
70	0.0150	0.0169	3.76
80	0.0171	0.0197	5.20
90	0.0193	0.0221	5.57
100	0.0214	0.0240	5.23
110	0.0236	0.0260	4.90
120	0.0257	0.0282	4.86
130	0.0279	0.0303	4.95
140	0.0300	0.0323	4.48
150	0.0322	0.0344	4.56
160	0.0343	0.0366	4.65
170	0.0365	0.0387	4.45
180	0.0386	0.0408	4.42
190	0.0407	0.0427	3.80
200	0.0429	0.0450	4.17
210	0.0450	0.0470	3.84
220	0.0472	0.0487	2.96
230	0.0493	0.0500	1.41
240	0.0515	0.0511	0.68
250	0.0536	0.0525	2.23

Pengujian pemodelan matematis yang dibandingkan dengan *mini plant* menunjukkan perbedaan dengan *error* rata-rata 3.51%.

4.2 Analisa Hasil Uji Protokol Komunikasi WSN

Pengujian sistem komunikasi WSN dilakukan pada jarak 100 meter yang bertujuan mengetahui performansi sistem komunikasi, parameter yang diuji adalah waktu mengirim data dari miniplant ke operator. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 4.2.

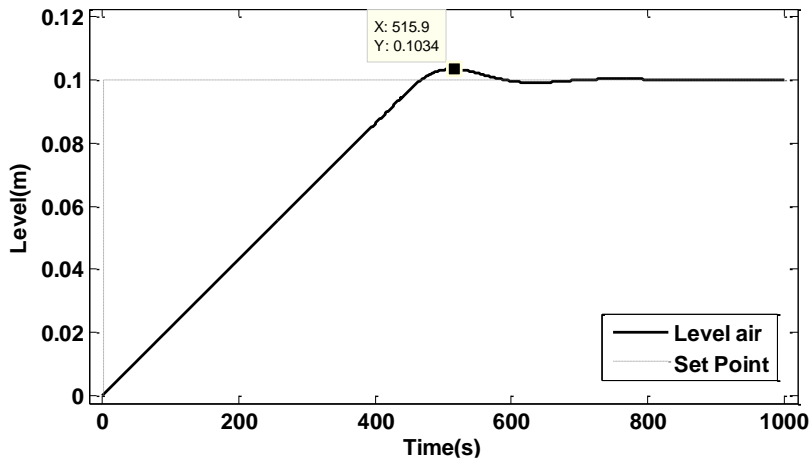
Tabel 4. 2 Performa sistem komunikasi WSN

<i>Time elapsed (s)</i>	<i>Delay (ms)</i>
1	53
2	43
3	46
4	55
5	51
6	54
7	47
8	54
9	52
10	53
11	52
12	50

Berdasarkan pengujian, sistem komunikasi WSN dapat berkomunikasi pada jarak 100 meter dengan delay rata rata 50.83 ms.

4.3 Analisa Hasil Uji Kontroler PI

Pengujian dan implementasi dilakukan untuk melihat karakteristik respon dinamik *plant* dari pemodelan kontroler yang dilah dirancang. Besar K_p dan T_i diatur sesuai dengan perhitungan yang telah dilakukan pada sub bab 3.10 yaitu 166.67 untuk K_p , dan 6.02 untuk T_i . Pengujian dilakukan selama 1000 detik pada level air dan minyak dengan besar *set point* 0.1 m. Hasil pengujian level air ditunjukkan pada Gambar 4.3, dan hasil pengujian pada level minyak ditunjukkan pada Gambar 4.4.

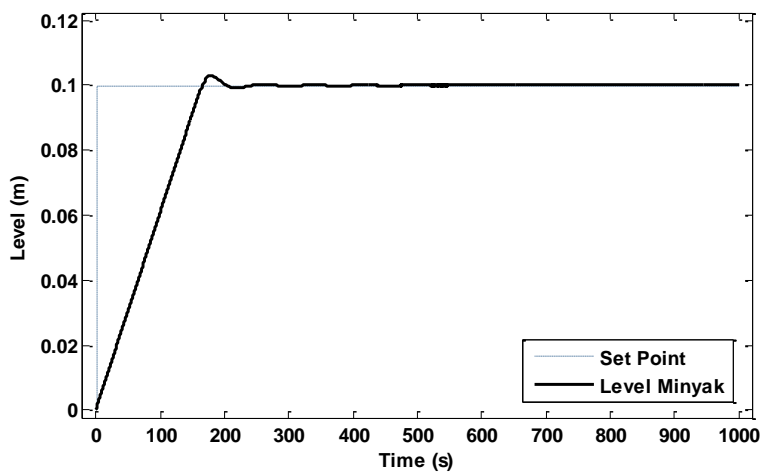


Gambar 4. 2 Hasil Pengujian Kontroler PI pada Level Air

Pengujian sistem pengendali PI pada level air menghasilkan respon dinamik yang ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Respon Dinamik Level Air dengan Pengendali PI

Parameter	Nilai
<i>Rise Time (s)</i>	411
<i>Settling Time (s)</i>	657
<i>Maximum Overshoot(%)</i>	3.5
<i>Error Steady State(%)</i>	0.3



Gambar 4. 3 Hasil Pengujian Kontroler PI pada Level Minyak

Pengujian sistem pengendali PI pada level minyak menghasilkan respon dinamik yang ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Respon Dinamik Level Minyak dengan Pengendali PI

Parameter	Nilai
<i>Rise Time (s)</i>	146
<i>Settling Time (s)</i>	223
<i>Maximum Overshoot(%)</i>	3.8
<i>Error Steady State(%)</i>	0.2

Pengujian juga dilakukan dengan melakukan beberapa variasi Kp dan Ti dengan tujuan mendapatkan basis pengetahuan dalam mendesain *rule base* sistem logika fuzzy. Variasi nilai Kp dan Ti menghasilkan respon dinamik yang ditunjukkan pada lampiran A dan lampiran B. Hasil dari variasi pengujian ditampilkan pada Tabel 4.5. dan Tabel 4.6

Tabel 4. 5 Respon Dinamik Level Air dengan Variasi Kp dan Ti

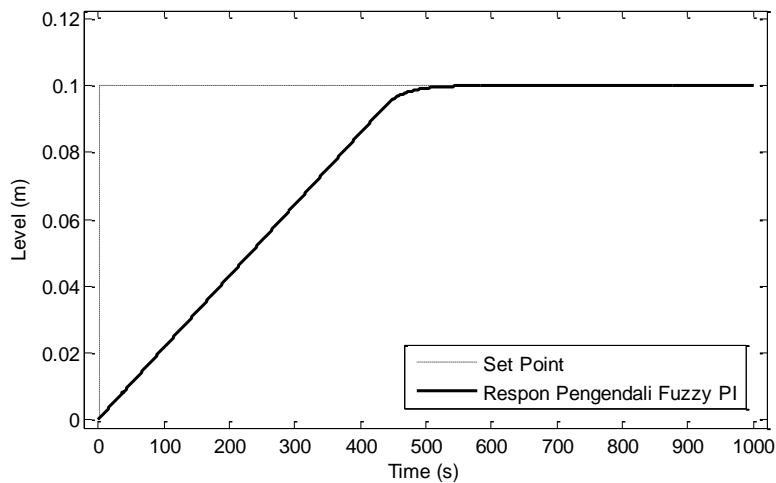
Variasi	<i>Rise Time (s)</i>	<i>Settling Time (s)</i>	<i>Maximum Overshoot(%)</i>	<i>Error Steady State(%)</i>
A1	430	980	3.9	0.1
A2	>1000	>1000	-	-
A3	432	805	6.1	0.5
A4	440	569	2.5	0.7

Tabel 4. 6 Respon Dinamik Level Minyak dengan Variasi Kp dan Ti

Variasi	<i>Rise Time (s)</i>	<i>Settling Time (s)</i>	<i>Maximum Overshoot(%)</i>	<i>Error Steady State(%)</i>
B1	140	450	4.2	0.4
B2	>1000	>1000	-	-
B3	143	340	6	0.3
B4	136	200	3.1	0.1

4.4 Analisa Hasil Uji Kontroler Fuzzy PI

Pengujian dilakukan untuk melihat karakteristik respon dinamik dari *plant*. Hasil defuzzifikasi dari sistem fuzzy akan merubah nilai K_p dan T_i setiap saat bergantung pada kondisi *error* dan *rule base* yang telah ditentukan, dengan kata lain sistem fuzzy akan membuat K_p dan T_i adaptif. Sistem logika fuzzy ini diharapkan dapat memperbaiki respon uji pada kontroler PI yang telah dilakukakan pada percobaan sebelumnya. Pengujian dilakukan selama 1000 detik pada level air dan minyak dengan besar *set point* 0.1 m. Hasil pengujian level air ditunjukkan pada Gambar 4.4, dan hasil pengujian pada level minyak ditunjukkan pada Gambar 4.5.

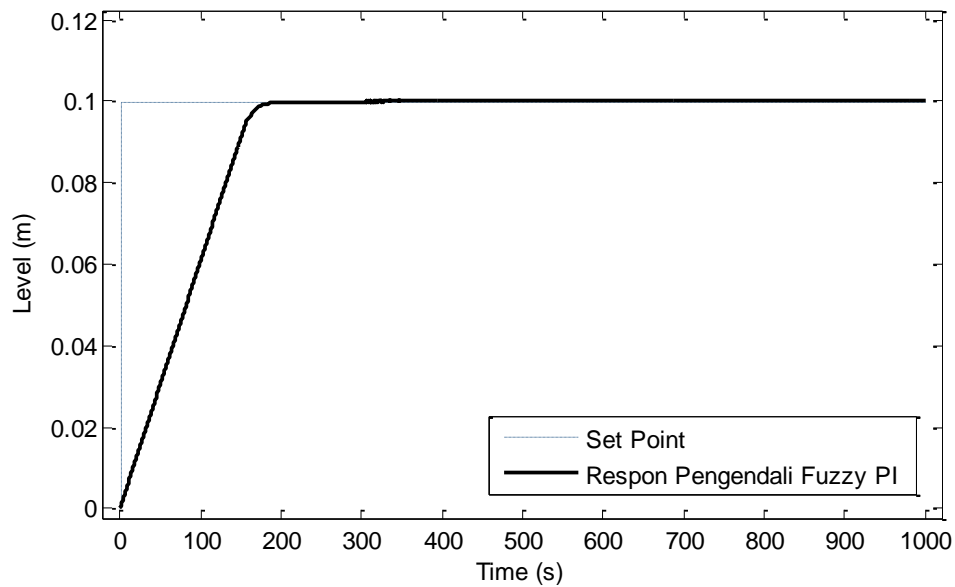


Gambar 4. 4 Respon Level Air dengan Pengendali Fuzy PI

Pengujian sistem pengendali Fuzzy PI pada level air menghasilkan respon dinamik yang ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4. 7 Respon Dinamik Level Air dengan Pengendali Fuzzy PI

Parameter	Nilai
<i>Rise Time (s)</i>	402
<i>Settling Time (s)</i>	492
<i>Maximum Overshoot(%)</i>	0.05
<i>Error Steady State(%)</i>	0.02



Gambar 4. 5 Respon Level Minyak dengan Pengendali Fuzy PI

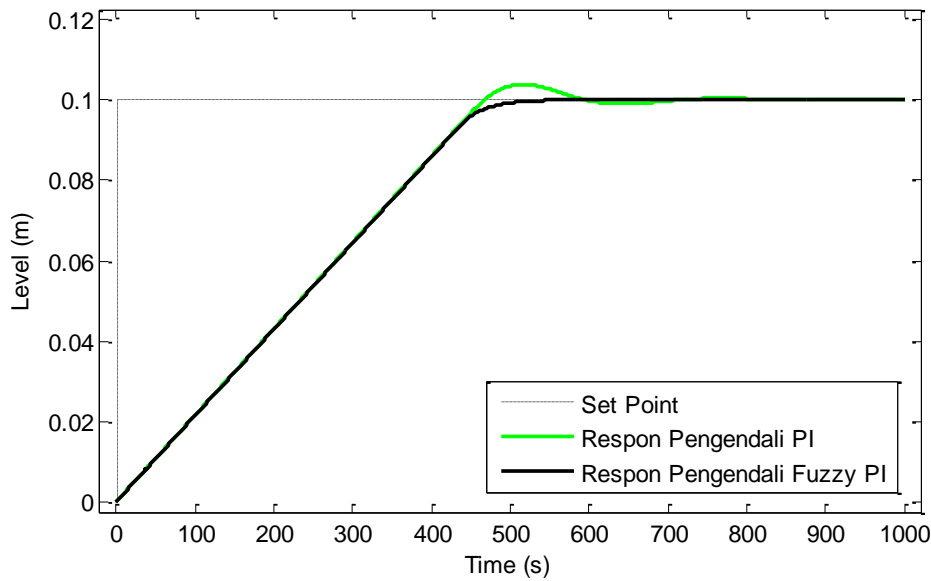
Pengujian sistem pengendali Fuzzy PI pada level minyak menghasilkan respon dinamik yang ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4. 8 Respon Dinamik Level Air dengan Pengendali Fuzzy PI

Parameter	Nilai
<i>Rise Time (s)</i>	118
<i>Settling Time (s)</i>	184
<i>Maximum Overshoot(%)</i>	0.06
<i>Error Steady State(%)</i>	0.02

4.5 Analisa Perbandingan Hasil Uji Pengendali Fuzzy PI dengan PI

Perbandingan hasil uji dilakukan dengan membandingkan performansi pengendali fuzzy PI dengan performansi terbaik pengendali PI dari berbagai variasi yang telah dilakukan pada sub bab 4.3. Perbandingan respon kedua pengendali ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4. 6 Perbandingan Respon Pengendali Fuzzy PI dengan PI

Hasil analisis kedua sistem pengendali ditunjukkan pada Tabel 4.9.

Tabel 4. 9 Respon Dinamik Level Air dengan Pengendali Fuzzy PI

Parameter	Fuzzy PI	PI
<i>Rise Time (s)</i>	402	411
<i>Settling Time (s)</i>	492	657
<i>Maximum Overshoot (%)</i>	0.05	3.5
<i>Error Steady State (%)</i>	0.02	0.3

Dari Tabel 4.9 menunjukkan bahwa pengendali fuzzy PI mempunyai *rise time* 9 detik lebih baik dari pengendali PI, *settling time* 165 lebih baik, *maximum overshoot* mempunyai selisih 3%, dan parameter *error steady state* mempunyai selisih 0.28%. Hal ini menunjukkan bahwa sistem pengendali Fuzzy PI mampu memperbaiki kekurangan yang ada pada sistem pengendali PI.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengendalian fuzzy PI pada *mini plant* separator tiga fasa menggunakan *interface dcs* berbasis *wireless sensor network* dan IoT secara real-time yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Sistem komunikasi dengan arsitektur *wireless sensor network* pada *mini plant* separator tiga fasa mampu berkomunikasi dua arah secara *realtime* pada jarak 100 meter dengan *delay time* rata rata 50.83 ms
2. Sistem pengendalian Fuzzy PI mampu meningkatkan performansi sistem pengendalian level air dan level minyak pada *mini plant* separator tiga fasa dengan menghasilkan respom dinamik yang lebih baik dari sistem pengendalian PI yang ditunjukkan dengan nilai *rise time* 402 s, *settling time* 492 s, *maximum overshoot* 0.05%, dan *error steady state* 0.02% pada pengendalian level. Sedangkan pada pengendalian level minyak sistem pengendali Fuzzy PI mempunyai *rise time* 118 s, *settling time* 184s, *maximum overshoot* 0.06%, dan *error steady state* 0.02%

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan oleh penulis pada pengembangan selanjutnya mengenai penelitian ini adalah penggunaan metode metode kontrol lainnya seperti jaringan syaraf tiruan, JST-PID, dan metode kontrol modern lainnya, namun jika penelitian selanjutnya masih menggunakan sistem kontrol fuzzy logic atau fuzzy-PID sebaiknya dalam perancangan *rule base* gunakan input lain yang mempengaruhi performa sistem, contohnya *delta error*.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Fuqaha, A. *et al.* (2015) 'Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications', *IEEE Communications Surveys and Tutorials*. doi: 10.1109/COMST.2015.2444095.
- Alcaraz, C., Fernandez, G. and Carvajal, F. (2012) 'Security aspects of SCADA and DCS environments', *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. doi: 10.1007/978-3-642-28920-0_7.
- Boyer, S. A. (2010) *SCADA: supervisory control and data acquisition*. USA: International Society of Automation.
- C. Goodwin, G. *et al.* (2011) *PID Theory Explained, Control*.
- Chen, J. *et al.* (2011) 'A survey on quality of service support in wireless sensor and actor networks: Requirements and challenges in the context of critical infrastructure protection', *Journal of Network and Computer Applications*. doi: 10.1016/j.jnca.2011.01.008.
- ControlEngineering (2020) *Tuning PID loops for level control*. Available at: <https://www.controleng.com/articles/tuning-pid-loops-for-level-control/> (Accessed: 26 May 2020).
- Digi (2018) *DigiMesh 2.4 Radio Frequency (RF)*. Available at: www.digi.com/howtobuy/terms (Accessed: 17 May 2020).
- DonVito (2016) *Servo valve*. Available at: <https://www.thingiverse.com/thing:1696851> (Accessed: 17 May 2020).
- Dunn, T. (2014) *Manufacturing Flexible Packaging: Materials, Machinery, and Techniques, Manufacturing Flexible Packaging: Materials, Machinery, and Techniques*. doi: 10.1016/C2013-0-09950-1.
- enggcyclopedia (2011) *Typical P&ID arrangement for 3 phase separator vessels - Enggcyclopedia*. Available at: <https://www.enggcyclopedia.com/2011/04/typical-pid-arrangement-3-phase-separator-vessels/> (Accessed: 14 May 2020).
- Galloway, B. and Hancke, G. P. (2013) 'Introduction to industrial control

- networks', *IEEE Communications Surveys and Tutorials*. doi: 10.1109/SURV.2012.071812.00124.
- Gantz, J., Reinsel, D. and Shadows, B. D. (2012) 'The Digital Universe in 2020', *IDC iView 'Big Data, Bigger Digital Shadows, and Biggest Growth in the Far East'*.
- Ghaffarkhah, A. *et al.* (2017) 'Application of CFD for designing conventional three phase oilfield separator', *Egyptian Journal of Petroleum*. doi: 10.1016/j.ejpe.2016.06.003.
- Goodwin, G. C., Graebe, S. F. and Salgado, M. E. (2007) 'Control System Design', *IEEE Control Systems*. doi: 10.1109/MCS.2007.284513.
- Gubbi, J. *et al.* (2013) 'Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions', *Future Generation Computer Systems*. doi: 10.1016/j.future.2013.01.010.
- Ibrahim, D. (2019) *Arm-based microcontroller projects using mbed, ARM-based Microcontroller Projects Using Mbed*. doi: 10.1016/C2018-0-02627-4.
- Internet Live Stats - Internet Usage & Social Media Statistics* (2020). Available at: <https://www.internetlivestats.com/> (Accessed: 15 May 2020).
- ITU (2003) *G.114: One-way transmission time*. Available at: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.114> (Accessed: 5 August 2020).
- Karakose, M., Yetis, H. and Akin, E. (2018) 'Sine-square embedded fuzzy sets versus type-2 fuzzy sets', *Advanced Engineering Informatics*. Elsevier Ltd, 36, pp. 43–54. doi: 10.1016/j.aei.2018.02.007.
- Khan, R. *et al.* (2012) 'Future internet: The internet of things architecture, possible applications and key challenges', in *Proceedings - 10th International Conference on Frontiers of Information Technology, FIT 2012*. doi: 10.1109/FIT.2012.53.
- Kinetis K66 32-bit MCUs / NXP* (2020). Available at: https://www.nxp.com/products/processors-and-microcontrollers/arm-microcontrollers/general-purpose-mcus/k-series-cortex-m4/k6x-ethernet/kinetis-k66-180-mhz-dual-high-speed-full-speed-usbs-2mb-flash-microcontrollers-mcus-based-on-arm-cortex-m4-core:K66_180 (Accessed: 16 May 2020).

- Knapp, E. (2011a) 'Industrial Network Protocols', in *Industrial Network Security*. doi: 10.1016/b978-1-59749-645-2.00004-5.
- Knapp, E. (2011b) *Industrial network security: Securing critical infrastructure networks for smart grid, scada, and other industrial control systems, Industrial Network Security: Securing Critical Infrastructure Networks for Smart Grid, SCADA, and Other Industrial Control Systems*. doi: 10.1016/B978-1-59749-645-2.00024-0.
- Lu, C. *et al.* (2016) 'Real-Time Wireless Sensor-Actuator Networks for Industrial Cyber-Physical Systems', *Proceedings of the IEEE*. doi: 10.1109/JPROC.2015.2497161.
- MicrochipUA (2015). Available at: <http://www.ai-thinker.com> (Accessed: 17 May 2020).
- Mokhatab, S. *et al.* (2013) *Handbook of Liquefied Natural Gas, Handbook of Liquefied Natural Gas*. doi: 10.1016/C2011-0-07476-8.
- Ogata, K. (2010) *Engenharia de Controle Moderno, Control Engineering*.
- Passino, K. M. and Yurkovich, S. (2010) 'Fuzzy control', in *The Control Systems Handbook: Control System Advanced Methods, Second Edition*. doi: 10.1201/b10384.
- PERTAMINA EP (2017) 'Pendopo Filed'. doi: 10.20473/ijosh.v6i2.2017.146-155.
- PJRC (2020). Available at: <https://www.pjrc.com/store/teensy36.html> (Accessed: 16 May 2020).
- Pospíchal, J. (1996) 'Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications. By George J. Klir and Bo Yuan. Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, 1995. 574 pp. \$60.00. ISBN 0-13-101171-5. Sales e-mail: corpsales@prenhall.com.' , *Journal of Chemical Information and Computer Sciences*. doi: 10.1021/ci950144a.
- Sajid, A., Abbas, H. and Saleem, K. (2016) 'Cloud-Assisted IoT-Based SCADA Systems Security: A Review of the State of the Art and Future Challenges', *IEEE Access*. doi: 10.1109/ACCESS.2016.2549047.
- Sensortec, B. (2011) *BMP085 Digital pressure sensor*.
- Toulson, R. and Wilmshurst, T. (2012) *Fast and Effective Embedded Systems Design, Fast and Effective Embedded Systems Design*. doi: 10.1016/C2011-

0-05109-8.

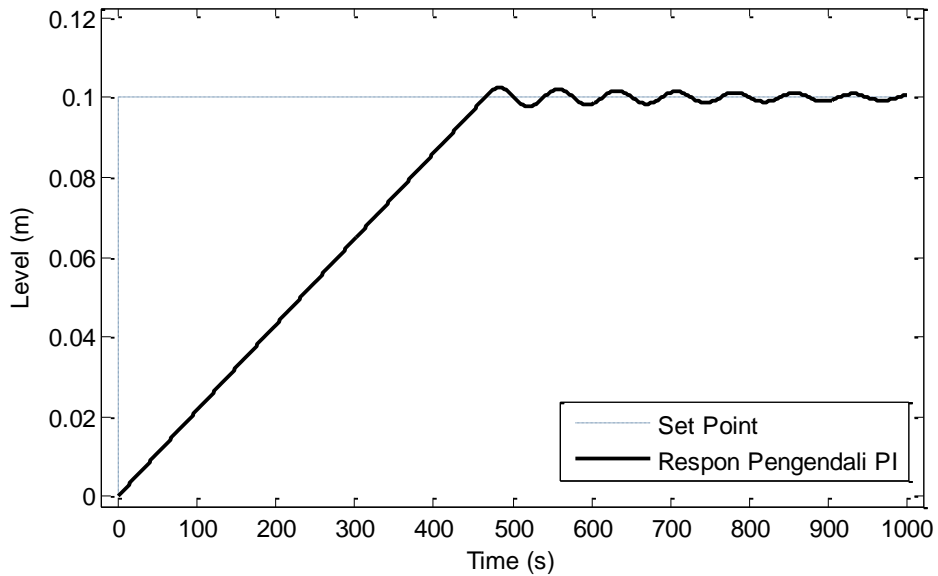
Visioli, A. and Zhong, Q. C. (2011) 'PID control', in *Advances in Industrial Control*. doi: 10.1007/978-0-85729-070-0_2.

Wilhelmsen, M. (2013) *Control Structure and Tuning Method Design for suppressing Disturbances in a multi-phase Separator, 110*. Institutt for teknisk kybernetikk. Available at: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/260996> (Accessed: 5 August 2020).

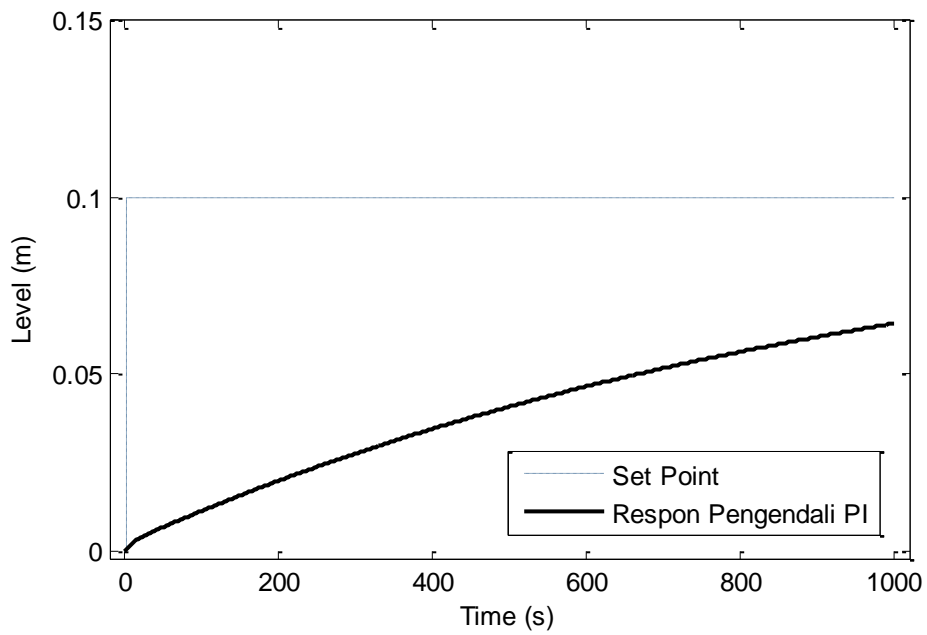
LAMPIRAN

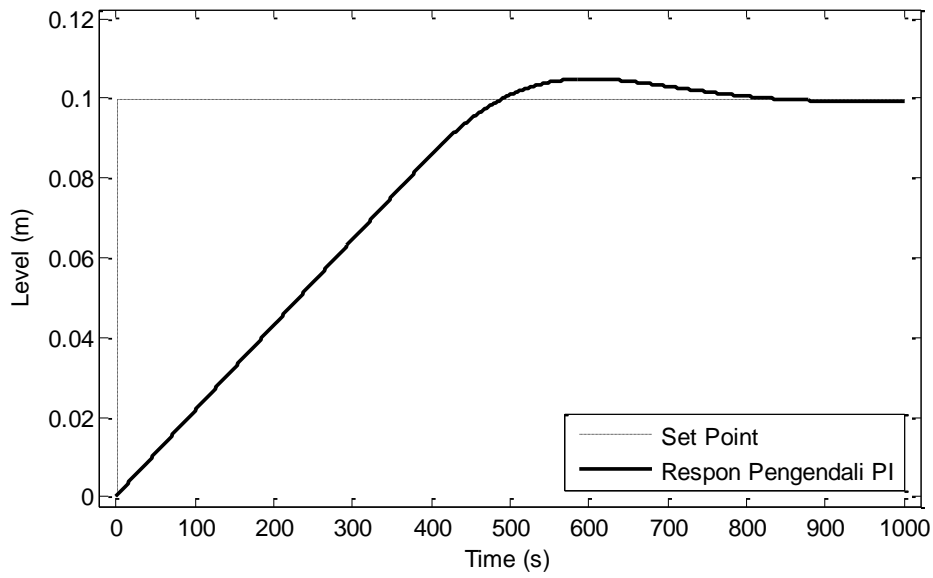
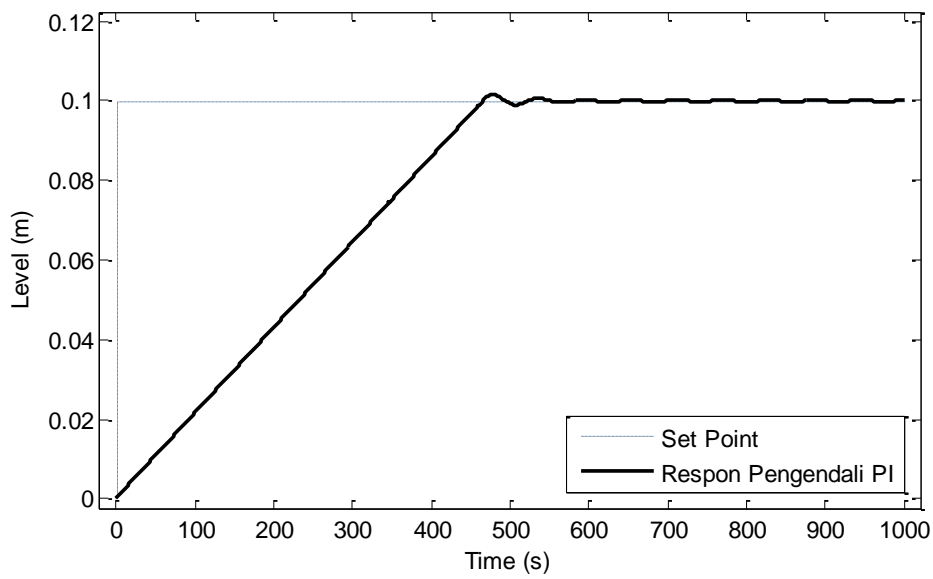
Lampiran A. Respon dinamik sistem pengendalian PI pada level air

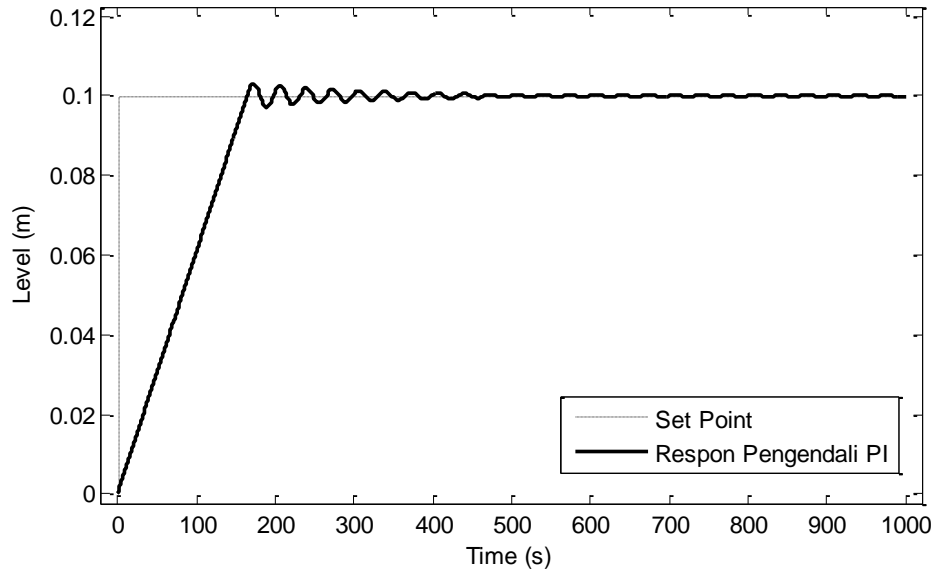
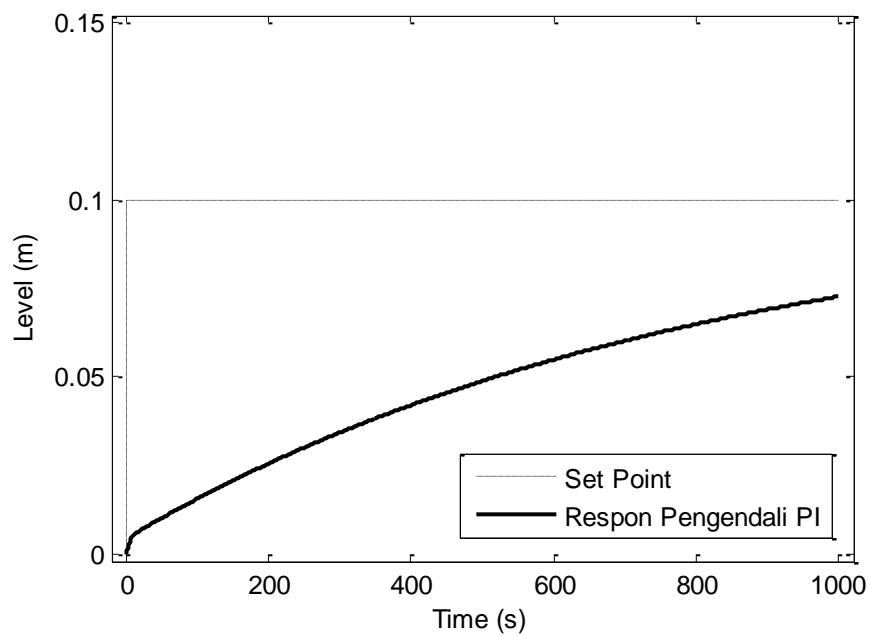
A1. Variasi $K_p = 1000$ (Besar), $T_i = 15$ (Besar)

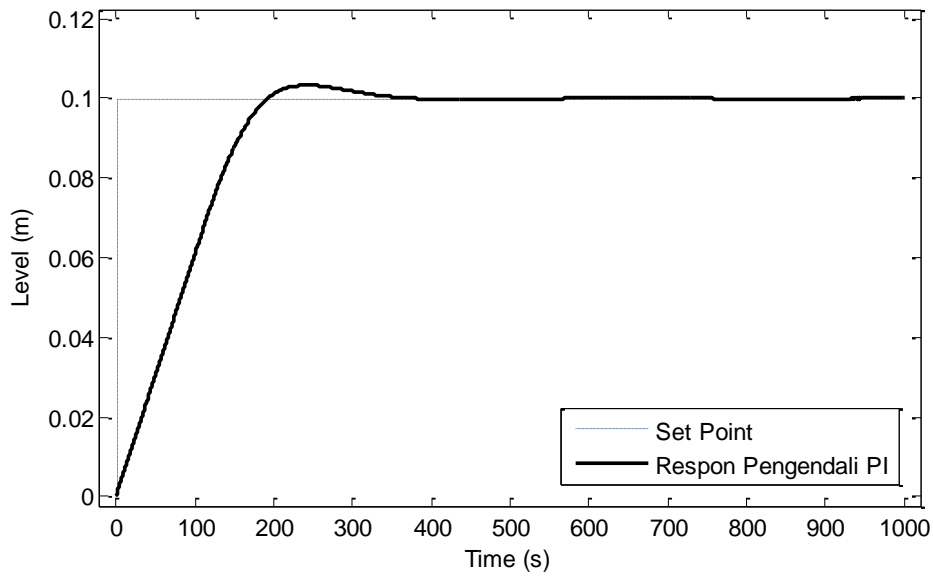
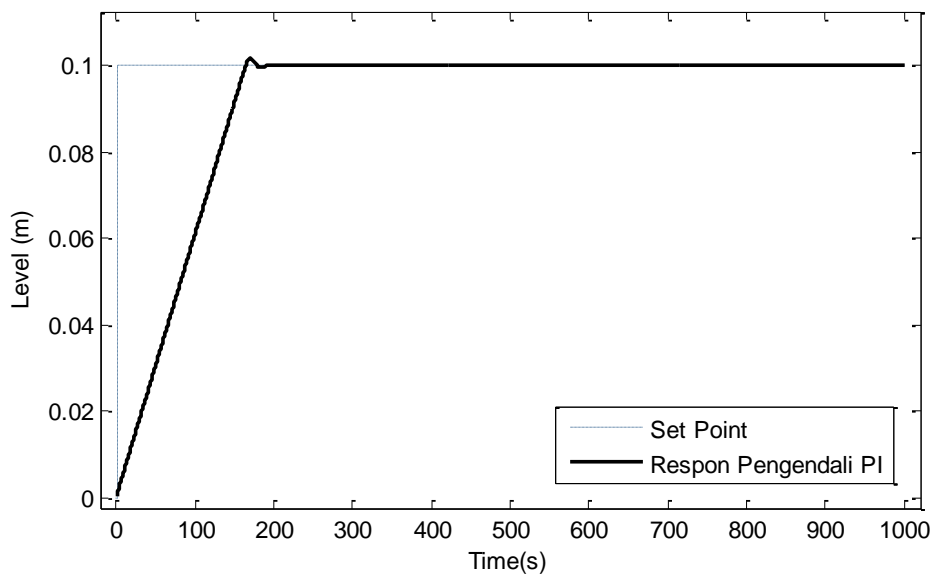


A2. Variasi $K_p = 150$ (Kecil), $T_i = 1$ (Kecil)



A3. Variasi $K_p = 1000$ (Besar), $T_i = 1$ (Kecil)A4. Variasi $K_p = 150$ (Kecil), $T_i = 15$ (Besar)

Lampiran B. Respon dinamik sistem pengendalian PI pada level minyakB1. Variasi $K_p = 1000$ (Besar), $T_i = 15$ (Besar)B2. Variasi $K_p = 150$ (Kecil), $T_i = 1$ (Kecil)

B3. Variasi $K_p = 1000$ (Besar), $T_i = 1$ (Kecil)B4. Variasi $K_p = 150$ (Kecil), $T_i = 15$ (Besar)

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIODATA PENULIS



Sapto Wahyu Sudrajat lahir di Kabupaten Blitar, 14 Oktober 1996 adalah anak kedua dari dua bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formalnya di TK Dharma Wanita, SDN Jationom 02, SMPN 4 Blitar, dan SMAN 2 Blitar. Pada tahun 2015 penulis telah diterima di Departemen Teknik Fisika FT-IRS ITS dengan NRP 02311540000053. Saat berstatus mahasiswa, penulis aktif dalam kegiatan penelitian laboratorium dengan bidang penelitian pengembangan sistem komunikasi *wireless*. Penulis juga aktif dalam mengikuti kompetisi internasional bidang mobil hemat energi sebagai divisi elektronik dan kontrol. Penulis dapat dihubungi melalui email saptowahyusudrajat@gmail.com