



BAB I PENDAHULUAN

1.1. Apakah instrumentasi dan Pengendalian Proses itu ?

Instrumentasi digambarkan sebagai "*the art and science of measurement and control*". Atau dengan kata lain instrumentasi adalah seni dan ilmu pengetahuan dalam penerapan alat ukur dan sistem pengendalian pada suatu obyek untuk tujuan mengetahui harga numerik variable suatu besaran proses dan juga untuk tujuan mengendalikan besaran proses supaya berada dalam batas daerah tertentu atau pada nilai besaran yang diinginkan (*set point*).

Operasi di industri proses seperti kilang minyak (*refinery*) dan petrokimia (*petrochemical*) sangat bergantung pada pengukuran dan pengendalian besaran proses. Beberapa besaran proses yang harus diukur dan dikendalikan pada suatu industri proses, misalnya aliran (*flow*) di dalam pipa, tekanan (*pressure*) didalam sebuah vessel, suhu (*temperature*) di unit *heat exchange*, serta permukaan (*level*) zat cair di sebuah tangki.

Selain besaran proses di atas, beberapa besaran proses lain yang cukup penting dan kadang-kadang perlu diukur dan dikendalikan oleh karena kebutuhan specific proses, diantaranya ; *hydrogen ion concentration (pH)*, *moisture content*, *conductivity*, *density or specific gravity*, *combustible content of flue gas*, *oxygen content of flue gas*, *chromatographic stream composition*, *nitrogen oxides emissions*, *calorimetry (BTU content)* dan sebagainya. Besaran-besaran ini ada yang perlu diukur secara *on-line* dan ada juga yang hanya diukur atau dianalisa di laboratorium.

Suatu sistem pengendalian proses terdiri atas beberapa unit komponen antara lain ; sensor/transducer yang berfungsi menghasilkan informasi tentang besaran yang diukur, transmitter yang memproses informasi atau sinyal yang dihasilkan oleh sensor/transducer agar sinyal tersebut dapat ditransmisikan, controller yang berfungsi membandingkan sinyal pengukuran dengan nilai besaran yang diinginkan (*set point*) dan menghasilkan sinyal komando berdasarkan strategi control tertentu serta actuator yang berfungsi mengubah masukan proses sesuai dengan sinyal komando dari pengontrol.

1.2. Tujuan Penulisan

Buku Dasar Instrumentasi dan Proses Kontrol (*Basic Instrumentation & Process Control*) ini disusun untuk materi pendidikan Bimbingan Profesi Sarjana Teknik (BPST) angkatan XVII Pertamina Direktorat Pengolahan. Tujuannya untuk memberikan pengertian tentang dasar instrumentasi dan proses kontrol yang digunakan didalam industri proses.

Buku ini disusun dalam lima bab. Bab 2 membahas mengenai sejarah perkembangan instrumentl, dimulai dari instrument teknologi pneumatik, teknologi elektronik serta



teknologi digital. Juga membahas tentang architecture sistem kontrol proses, dimulai dari sistem kontrol tradisional, sistem kontrol berbasis computer dan sistem control berbasis DCS (*Distributed Control System*).

Bab 3 membahas mengenai pengukuran besaran proses (flow, level, pressure dan temperature) mencakup prinsip-prinsip dasar yang diterapkan untuk melakukan pengukuran dan berbagai modifikasi yang ada. Untuk setiap pengukuran besaran proses yang ditinjau, dibahas sejumlah instrument yang dapat digunakan untuk mengukur besaran tersebut dengan dilengkapi penjelasan tentang keunggulan dan kelemahan dari instrument tersebut.

Bab 4 membahas mengenai komponen instrumentasi yang digunakan untuk memonitor dan mengendalikan jalannya suatu proses industri. Secara garis besar komponen ini dikelompokkan menjadi : Transmitter, Converter, Instrument Signal Transmission, Indicator, Recorder, Controller dan Control Valve.

Bab 5 membahas mengenai sistem kontrol proses, algoritma aksi pengontrolan (On/Off, P, PI, PD dan PID), sistem kontrol (flow control, pressure control, level control dan temperature control) serta klasifikasi loop kontrol proses dan aplikasinya mulai dari simple loop control (feed back control dan feed forward contro) dan complicated loop control (cascade control, split range control dan ratio control).

Bab 6 membahas sekilas tentang konfigurasi DCS Yokogawa Centum-XL yang terpasang dan digunakan untuk memonitor dan mengendalikan kilang UP-VI Balongan.

Bagaian akhir dari buku ini menampilkan daftar pustaka yang berisi buku acuan atau bahan acuan lain yang dapat dipakai untuk keperluan studi lebih lanjut atau untuk mendapatkan informasi detail tentang meteri yang ditampilkan dalam buku ini.



BAB II

SEJARAH PERKEMBANGAN INSTRUMENT & SISTEM KONTROL

2.1. Mengapa Diperlukan Pengukuran dan Pengontrolan

Pengukuran yang teliti dan sistem kontrol yang tepat dalam industri proses, dapat menghasilkan harga variable fisika dan kimia dari sistem yang sesuai dengan harga perancangannya. Hal ini akan dapat menghemat biaya operasi serta perbaikan hasil produksi.

Sebagai contoh, harga temperature yang tepat dalam pemrosesan minyak mentah (*crude oil*) akan menghasilkan produk terbaiknya. Jika harga temperature ini digunakan untuk mengontrol aliran atau jumlah bahan bakar yang digunakan didalam proses pemanasan, maka tidak akan terjadi "overheating" pada proses tersebut sehingga jumlah bahan bakar dapat dihemat.

Tujuan dari penerapan sistem instrumentasi dan kontrol di dalam industri proses adalah berkaitan dengan segi ekonomis. Oleh karena itu instrumentasi dan sistem kontrol yang diterapkan diharapkan dapat menghasilkan :

1. Kualitas produk yang lebih baik dalam waktu pemrosesan yang lebih singkat.
2. Biaya produksi yang lebih murah, oleh karena :
 - Penghematan bahan mentah dan bahan bakar.
 - Peningkatan efisiensi waktu mesin dan pekerja.
 - Pengurangan produksi yang rusak (off spec.).
3. Peningkatan keselamatan personil dan peralatan.
4. Pengurangan polusi lingkungan dari bahan limbah hasil proses.

Berdasarkan ini, maka beberapa hal yang termasuk dalam sistem instrumentasi dan kontrol meliputi :

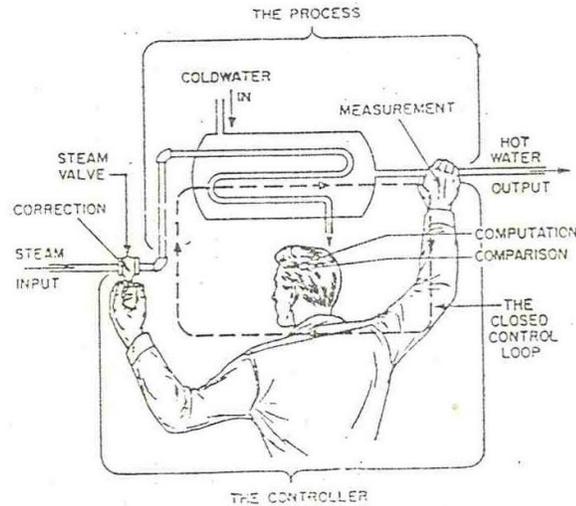
1. Karakteristik proses.
2. Sistem pengukuran.
3. Pemrosesan data otomatis.
4. Sistem pengontrolan dengan elemen kontrol akhir (*final control element*).

Keempat butir sistem instrumentasi dan kontrol tersebut di atas sudah dilakukan sejak awal oleh setiap orang yang ingin memperoleh harga tertentu dari suatu besaran fisika. Gambar 2.1 menunjukkan bagaimana seseorang ingin memperoleh temperature air yang sesuai dengan keinginannya, dimana semua sistem dioperasikan oleh manusia secara manual.

1. Sebagai proses adalah pemanasan air dengan sumber kalor dari steam.
2. Sebagai alat ukur adalah tangan kanan pemakai.

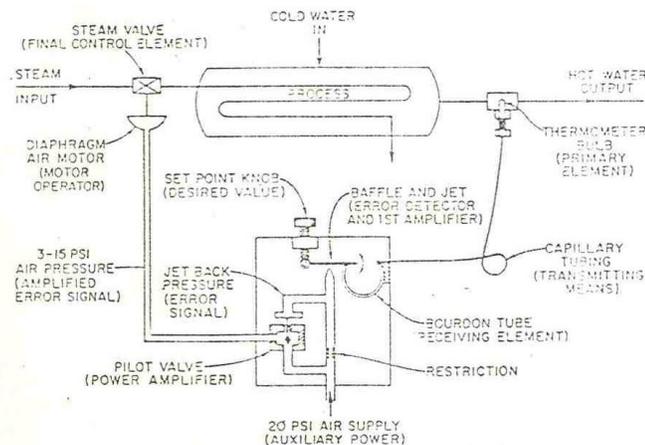
3. Sebagai prosesor adalah otak pemakai, yang akan mengevaluasi apakah temperature air sudah sesuai dengan keperluannya.
4. Sebagai sistem control dan final control elemen adalah tangan kiri pemakai dan kran steam.

Jadi langkah sederhana ini telah mencakup semua langkah dalam sistem instrumentasi dan kontrol pada industri proses yang dilakukan secara manual.



Gambar 2.1. Pengaturan temperature air secara manual

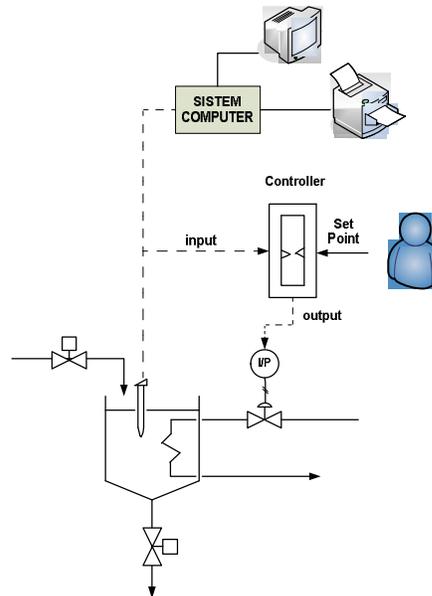
Dalam pengembangan selanjutnya, sistem pada gambar 2.1 dikembangkan sehingga tidak semua langkah dalam proses dilakukan oleh manusia, lihat gambar 2.2. Dalam sistem ini, temperature yang dikehendaki (set point temperature) dapat ditentukan sebagai suatu acuan, sedangkan alat ukur temperature dilakukan oleh sensor pressure thermometer, sistem kontrol dan final control elemennya dilakukan oleh sistem pneumatik dan katup pengontrol (control valve).



Gambar 2.2. Pengaturan temperature air secara pneumatic



Dalam perkembangan yang terakhir ini (gambar 2.3), langkah pengukuran, pemrosesan data dan pengontrolan berbagai besaran fisika atau kimia tidak dilakukan secara terpisah, tetapi dilakukan secara simultan. Hal ini memerlukan suatu processor yang dapat mengkoordinasi hasil pengukuran dan tindak lanjut berdasarkan pilihan algoritma yang dapat digunakan dalam mengkoordinasi langkah sistem instrumentasi. Juga berdasarkan kemampuannya dalam melakukan pemantauan dan pengolahan data, selanjutnya mengeluarkan hasil pengolahan untuk memicu final control element pada proses.



Gambar 2.3. Sistem Instrumentasi berbasis computer

2.2. Sejarah Perkembangan Teknologi Instrumentasi

Perkembangan instrumentasi dan sistem kontrol yang dimulai tahun 1930 hingga saat ini, dipengaruhi dua factor, yaitu ; kebutuhan pemakai dan kemajuan teknologi. Kebutuhan pemakai dalam menangani proses yang semakin rumit dan besar ini akan menuntut peningkatan teknologi sistem kontrol.

Dalam mengatasi hal ini maka pemilik pabrik (*owner*) berusaha lebih meningkatkan sistem otomatisasi pada pabrik untuk tujuan optimasi pengoperasian pabrik. Sesuai dengan kebutuhan pemakai ini, maka para pemasok (*vendor*) peralatan instrumentasi dan kontrol menawarkan sistem yang terintegrasi antara pemantauan, pengontrolan, serta sistem penyimpanan dan pengambilan data.

Kemajuan teknologi dalam bidang elektronika juga merupakan faktor yang menentukan cepatnya perkembangan instrumentasi dan sistem kontrol. Pada masa sebelum tahun 70-an, instrumentasi pneumatik yang menggunakan teknologi *flapper-nozzle*, tubing tembaga dengan angin instrument merupakan instrumentasi yang tergolong teknologi tinggi pada saat itu. Perkembangan transistor dan rangkaian analog yang terintegrasi pada awal tahun 70-an menghasilkan



kemampuan dan meningkatkan kehandalan instrumentasi dan sistem control elektronik. Kemajuan ini mengakibatkan instrumentasi dan sistem kontrol dengan teknologi elektronik analog dapat menggantikan teknologi pneumatik.

Perkembangan teknologi komputer digital yang didukung oleh perkembangan yang pesat di bidang mikro-elektronika (*microprocessor*) di pertengahan tahun 70-an telah memberikan dampak yang positif dan nyata pada instrumentasi dan sistem kontrol pada industri proses, termasuk pula di industri pengolahan minyak dan gas bumi serta industri kimia. Perkembangan teknologi ini mengakibatkan instrumentasi dan sistem kontrol berbasis teknologi digital dapat menggantikan teknologi elektronik analog pada banyak penerapannya.

Sejalan dengan ditemukannya komponen elektronik yang berkemampuan tinggi sebagai perangkat keras (*hardware*) dan diikuti pula dengan perkembangan perangkat lunak (*software*) yang demikian majunya, telah melahirkan konsep-konsep baru di dalam dunia instrumentasi dan sistem kontrol. Sistem baru ini berkembang sangat pesat dan dikenal sebagai teknologi *Programmable Logic Controller (PLC)* dan *Distributed Control System(DCS)*.

Pada awal tahun 80-an, perkembangan teknologi *microprocessor* sangat cepat dan diikuti dengan perkembangan perangkat lunak serta operating system UNIX yang semakin maju, maka diikuti juga dengan perkembangan teknologi DCS berbasis operating system UNIX.

Pada awal tahun 90-an setelah diluncurkan operating system berbasis Windows dan didukung dengan perkembangan teknologi *microprocessor* dengan kemampuan lebih besar, maka teknologi DCS memasuki babak baru yang luar biasa dalam dunia instrumentasi dan sistem kontrol yaitu DCS berbasis *Windows*. *Operator console* yang sebelumnya menggunakan *special computer/monitor* digantikan dengan *Personal Computer (PC)*.

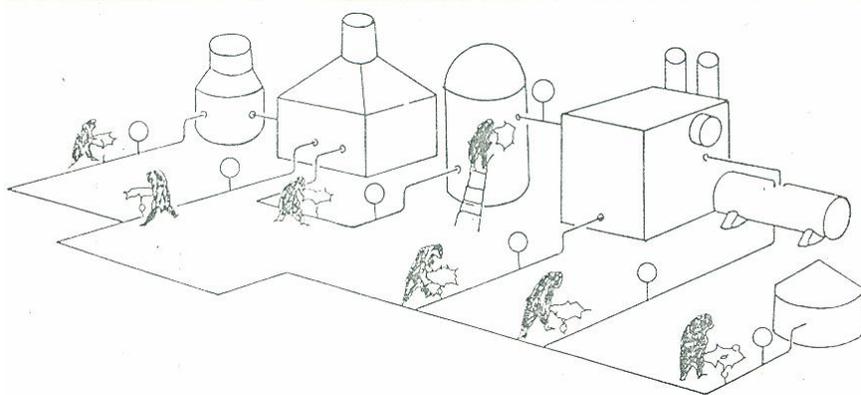
Selanjutnya pada akhir tahun 90-an, teknologi instrumentasi dan sistem kontrol berbasis DCS memasuki era baru yaitu *Open Network Technology* (teknologi dimana sub-system DCS dapat terhubung secara langsung dengan jaringan DCS tanpa menggunakan *Gateway* sebagai *network converter*) dengan menggunakan *Ethernet (TCP/IP)* sehingga memudahkan mengimplementasikan aplikasi seperti ; *PIMS (Plant Information Management System)*, *KMS (Knowledge Management System)*, *Enhanced Regulatory Control (ERC)*, *Advanced Process Control (APC)*, *Plant Optimization* dan lain-lain.

2.3. Perkembangan Architecture System control Proses

2.3.1. System Control Tradisional

Pada awalnya sistem kontrol yang terdapat di kilang minyak adalah konsep yang sekarang dikenal dengan sebutan sistem kontrol terdistribusi (gambar 2.4). Pada konsep ini, peralatan instrumentasi dan sistem kontrol didistribusikan di seluruh plant, dimana operator dapat membaca set point dan mengatur keluaran. Namun antara satu sistem kontrol dengan sistem kontrol yang lain tidak dihubungkan, sehingga operator harus bertugas mengkoordinasikan sistem kontrol yang terdistribusi tersebut. Komunikasi yang digunakan untuk mengintegrasikan pengoperasian kilang dilakukan dengan komunikasi verbal antara satu operator

dengan yang lain (interface antara manusia - manusia). Konsep ini tentunya hanya dapat dilakukan pada proses yang tidak rumit dan kecil.



Gambar. 2.4. Sistem Kontrol Tardisional

Setelah ditemukan instrumentasi dan system control pneumatik yang terhubung langsung pada tahun 1930, konsep architecture sistem kontrol masih sama dengan sebelumnya, dimana elemen kontrol seperti sensor, controller dan hubungan antara operator dengan actuator tetap tersebar di seluruh plant.

Situasi ini terus berubah sesuai dengan meningkatnya kapasitas dan kerumitan kilang. Suatu hal yang sulit untuk tetap mempertahankan architecture dimana setiap elemen kontrol tersebar di setiap lokasi. Akhirnya pada awal tahun 60-an setelah ditemukan sistem transmitter jenis pneumatik, membuat architecture sistem kontrol berubah menjadi terpusat dimana monitoring dan pengendalian proses dilakukan dari ruang kendali (*control room*) lihat gambar 2.5 (interface manusia – mesin).



Gambar 2.5. Sistem Kontrol Pneumatic terpusat di Control Room



Mekanisme sistem kontrol dengan architecture terpusat seperti ini dilakukan dengan cara ; pengukuran proses variabel dilakukan oleh sensor di lapangan, kemudian hasil pengukuran ditransmisikan oleh transmiiter ke controller yang berlokasi di ruang kendali. Selanjutnya sinyal kontrol yang diinginkan ditransmisikan kembali ke actuator pada unit proses. Keuntungan architecture ini adalah semua informasi yang diperlukan dapat ditampilkan di ruang kontrol sehingga mudah dilihat oleh operator dengan demikian operator dapat dengan mudah mengontrol kilang.

Pada awal tahun 70-an, architecture sistem control terpusat bergeser dari pneumatik menjadi elektronik. Perubahan ini mengurangi biaya pemasangan sistem kontrol dan waktu tunda (*lag time*) yang terjadi pada sistem kontrol pneumatik. Selain itu penggantian sistem kontrol pneumatik (3-15 psig atau 0.2-1.0 kg/cm²g) menjadi elektronik (4-20 mA atau 1-5 V) juga mengganti *tubing* yang diperlukan untuk sistem pneumatik menjadi kabel. Keuntungan system control elektronik ini, memungkinkan pabrik lebih mudah diperbesar atau dikembangkan.

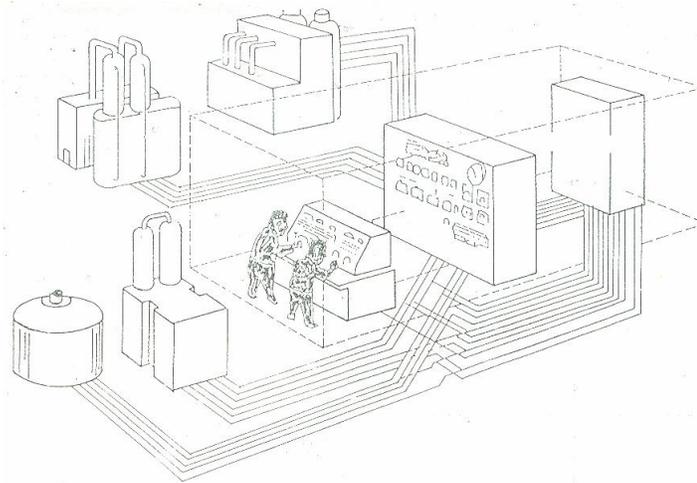
2.3.2. System Control berbasis Computer

Kelanjutan evolusi sistem kontrol tradisional adalah sistem kontrol berbasis computer. Penerapan computer dalam industri pertama dipasang pada stasiun pembangkit tenaga listrik untuk monitoring plant. Penemuan ini memberikan kemampuan data acquisition yang sebelumnya tidak ada, dan membebaskan operator dari pengoperasian plant berupa pengambilan dan penyimpanan data yang selama ini berulang dilakukan oleh operator.

Dalam waktu singkat setelah itu, sistem kontrol computer dipasang di pabrik kimia dan kilang. Penerapan ini masih menggunakan sistem control analog elektronik sebagai controller utama. Komputer difungsikan sebagai supervisory dimana menggunakan data masukan yang tersedia untuk menghitung setpoint control yang menghasilkan kondisi operasi yang efisien, selanjutnya setpoint ini dikirim ke controller analog yang berfungsi sebagai pengontrol loop tertutup. Kemampuan supervisory computer dalam mengambil, memperagakan dan menyimpan data yang dibutuhkan operator dapat memperbaiki pengoperasian pabrik dan menghasilkan nilai ekonomi yang optimum.

Tahap selanjutnya evolusi sistem kontrol computer pada proses adalah penggunaan computer pada loop control utama, biasa disebut *Direct Digital Control (DDC)* lihat gambar 2.6. Dalam pendekatan ini, pengukuran proses dilakukan computer secara langsung, computer menghitung keluaran kontrolnya, kemudian mengirimkan keluaran tersebut secara langsung ke alat penggerak (*final element*).

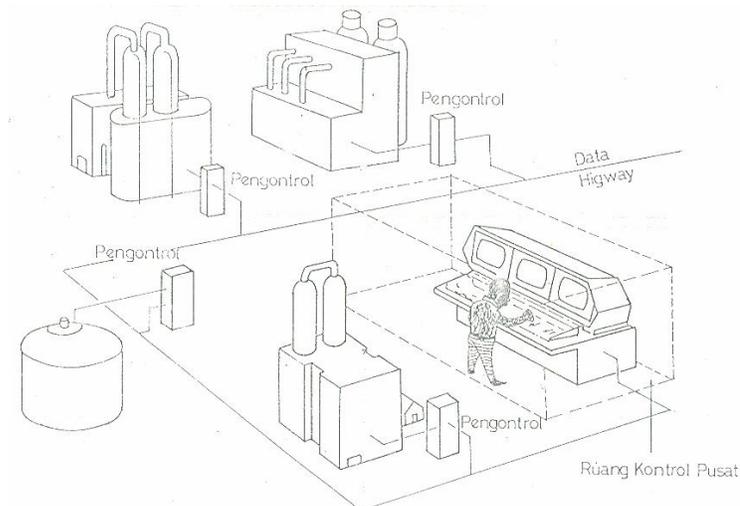
Sistem DDC tersebut pertama kali dipasang tahun 1970 pada pabrik kimia. Untuk keamanan, sistem kontrol analog elektronik masih disediakan, untuk menjamin proses tetap berjalan meskipun computer mengalami kegagalan (*failure*). Ini disebabkan karena pada awal sistem DDC masih terdapat masalah kehandalan perangkat keras computer. Meskipun ada masalah tersebut, ternyata sistem kontrol digital mempunyai kemampuan jauh lebih besar dari sistem kontrol analog dalam hal penalaan (*tuning*) parameter dan set point. Algoritma control yang rumit dapat diterapkan untuk memperbaiki pengoperasian plant, dan tuning parameter loop control dapat diset secara adaptif (*self tuning*) mengikuti perubahan kondisi operasi.



Gambar 2.6. Sistem Kontrol Direct Digital Control (DDC)

2.3.3. System Control Berbasis DCS

Architecture sistem control proses berbasis *Distributed Control System (DCS)* mulai diperkenalkan dalam era industri proses sekitar tahun 1976. Dari perkembangan DCS pertama kali hingga tahun 1995, telah terjadi penambahan fungsi dan modifikasi sehingga penggunaannya menjadi lebih *user friendly* dan perawatan yang mudah.

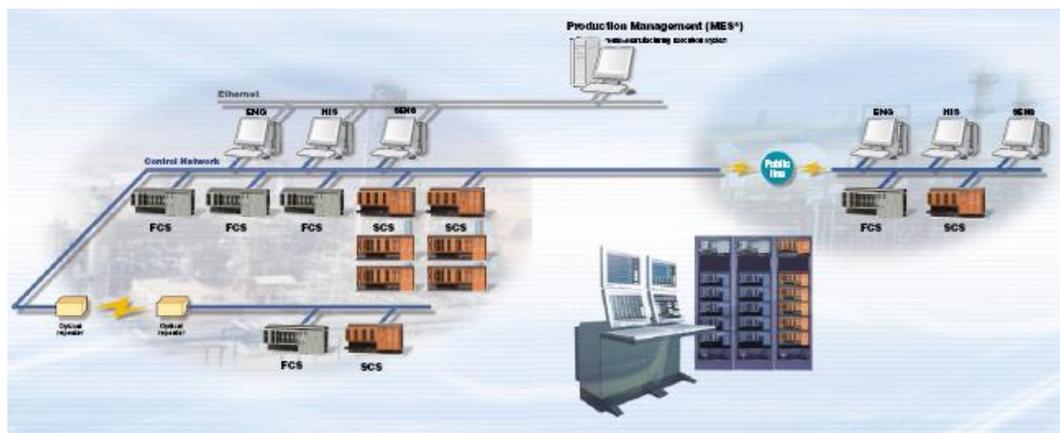


Gambar 2.7. Sistem Kontrol *Distributed Control System (DCS)*

DCS adalah suatu jaringan computer control yang dikembangkan untuk tujuan monitoring dan pengontrolan proses variable pada industri proses. Sistem ini

dikembangkan melalui penerapan teknologi microcomputer, software dan network. Sistem hardware dan software mampu menerima sinyal input berupa sinyal analog, digital maupun pulsa dari peralatan instrument di lapangan. Kemudian melalui fungsi feedback control sesuai algorithm control (P, PI, PID, dll) maupun sequence program yang telah ditentukan, sistem akan menghasilkan sinyal output analog maupun digital yang selanjutnya digunakan untuk mengendalikan *final control element* (*control valve*) maupun untuk tujuan *monitoring, reporting, dan alarm*.

Perlu diperhatikan disini bahwa fungsi kontrol tidak dilakukan secara terpusat, melainkan ditempatkan di dalam *satellite room* (*out station*) yang terdistribusi di lapangan (*field*). Setiap unit proses biasanya memiliki sebuah *out station*, di dalam *out station* tersebut terdapat peralatan *controller* (*control station & monitoring station*). Oleh karena peralatan tersebut berfungsi sebagai fasilitas untuk koneksi dengan peralatan instrumen lapangan (*instrument field devices*), maka peralatan tersebut sering juga disebut sebagai *process connection device*.



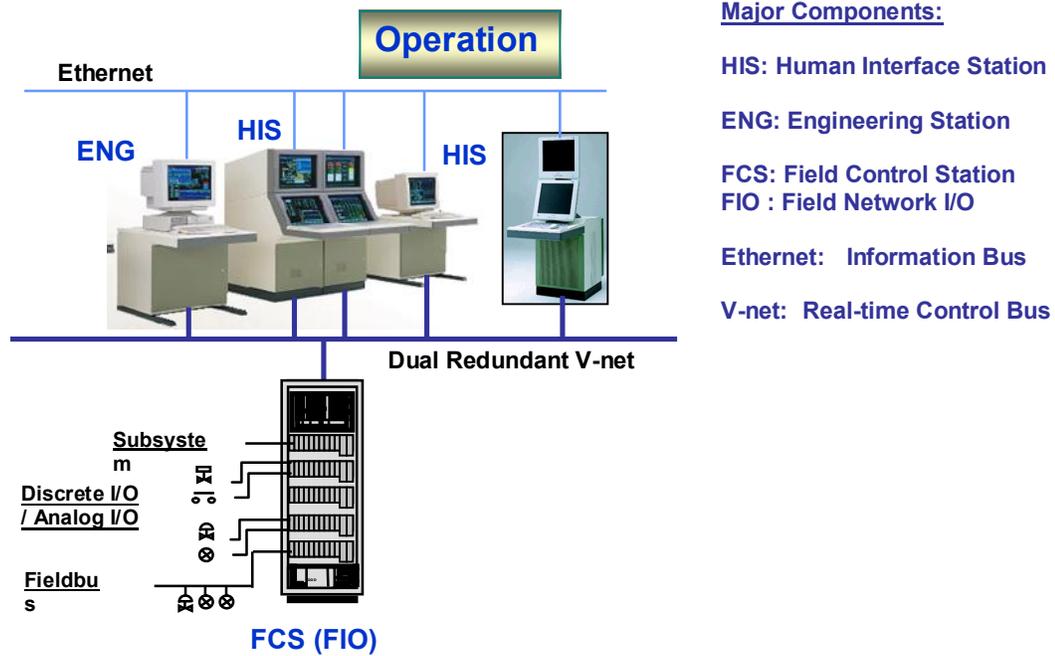
Gambar 2.8. Distributed Control System

Architecture DCS dapat dilihat pada gambar 2.9. yang secara garis besar terdiri dari tiga bagian utama yaitu ; *Man-Machine Interface, Process Connection Device* dan *Data Communication Facilities*.

Man-Machine Interface (MMI) atau *operator station* berfungsi sebagai pusat *monitoring dan* pengendalian proses di lapangan, dan ditempatkan secara terpusat di dalam ruang kendali (*control room*). Fungsi utama *operator station* adalah sebagai layar minitor untuk menampilkan, mengoperasikan, serta me-record data-data yang diperoleh dari *controller* yang ditempatkan di *out station*.

Process Connection Devices atau disebut juga *Field Control Station* yang berfungsi sebagai peralatan *controller* (*control station & monitoring station*) terdiri dari module-modul CPU (Processor), I/O Module, Communication Module dan Power Supply Module, dlll.

Data communication facilities berfungsi sebagai media komunikasi data secara *real time* antara *station-station* yang terhubung pada *communication-bus* (*data-hiway*), terutama antara *control station, monitoring station* dengan *operator station*.



Gambar 2.9. Architecture Distributed Control System

Pertamina, khususnya Direktorat Pengolahan telah mengimplementasikan teknologi DCS hampir di seluruh Unit Pengolahan untuk monitoring dan pengontrolan operasi kilang, antara lain :

1. UP-II (Foxboro)
2. UP-III (Honeywell & Yokogawa)
3. UP-IV (Yamatake-Honeywell)
4. UP-V (Honeywell & Yokogawa)
5. UP-VI (Yokogawa).



BAB III

MEASURING DEVICES

(FLOW, LEVEL, PRESSURE & TEMPERATURE)

3.1. Umum

Alat ukur (*measuring device*) adalah alat yang berada di lapangan (*field*) untuk mengukur variable proses seperti *flow*, *pressure*, *level* dan *temperature*. Pada industri proses output data dari alat ukur akan ditransmisikan ke ruangan control (*control room*) untuk diproses lebih lanjut dalam kaitannya dengan sistem kontrol.

Pemilihan jenis alat ukur yang sesuai dan terbaik untuk mengukur suatu variable proses, sering kali sukar dilaksanakan, bahkan seorang engineer yang berpengalaman dan sudah mempunyai metoda pemilihan akan mengalami demikian.

Pemilihan dapat lebih sederhana bilamana semua kondisi operasi (*service condition*) yang dipersyaratkan diketahui. Beberapa pengukuran memerlukan lebih informasi dibanding dengan yang lain. Sebagai contoh, beberapa kondisi operasi dan *stream characteristic* harus diketahui untuk aplikasi pengukuran aliran (*flow*) dibanding untuk peralatan pengukuran tekanan (*pressure*). Oleh karena itu sangat penting untuk mendaftar semua informasi yang berhubungan dengan pemilihan alat ukur yang dimaksud.

3.2. Pengukuran Aliran Fluida (Flow Measurements)

Pengukuran aliran fluida adalah sangat penting di dalam suatu industri proses seperti kilang minyak (*refinery*), pembangkit listrik (*power plant*) dan industri kimia (*petrochemical*). Pada industri proses seperti ini, memerlukan penentuan kuantitas dari suatu fluida (*liquid*, *gas* atau *steam*) yang mengalir melalui suatu titik pengukuran, baik didalam saluran yang tertutup (*pipe*) maupun saluran terbuka (*open channel*). Kuantitas yang ditentukan antara lain ; laju aliran volume (*volume flow rate*), laju aliran massa (*mass flow rate*), kecepatan aliran (*flow velocity*).

Instrumen untuk melakukan pengukuran kuantitas aliran fluida ini disebut *flowmeter*. Pengembangan flowmeter ini melalui tahapan yang luas mencakup pengembangan flow sensor, interaksi sensor dan fluida melalui penggunaan teknik komputasi (*computation techniques*), transducers dan hubungannya dengan unit pemrosesan sinyal (*signal processing units*), serta penilaian dari keseluruhan sistem di bawah kondisi ideal, kondisi gangguan (*disturbed*), kasar (*harsh*), kondisi berpotensi meledak (*explosive conditions*) serta pada lokasi laboratorium dan lapangan (*field*).

3.2.1. Pengelompokan (Categorization)

Beberapa jenis flowmeter yang sering digunakan di dalam industri proses dapat dikelompokkan sebagai berikut :

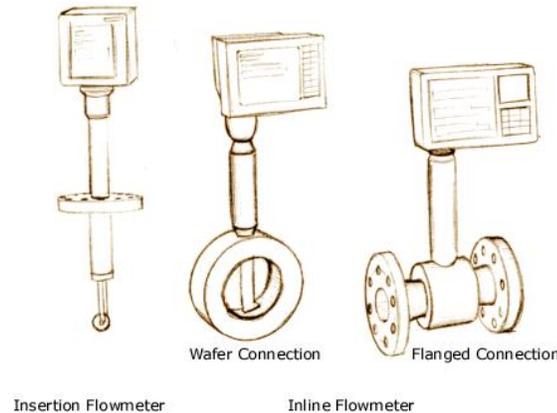


No	Flowmeter	
1.	Differential Pressure	Orifice Venturi Tube Flow Nozzle Pitot Tube Pitot Tube (Averaging) Anubar Elbow Taps Wedge V-Cone Dall Tube
2.	Variable Area	Rotameter Movable Vane Weir, Flume
3.	Positive Displacement	Nutating Disc Oscillating Piston Oval Gear Roots
4.	Turbine	
5.	Thermal	
6.	Target	
7.	Ultrasonic	Doppler Transit Time
8.	Magnetic	
9.	Coriolis	
10.	Vortex	

3.2.2. Pemasangan (Instalation)

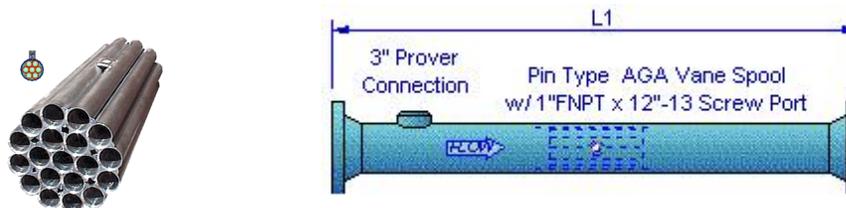
Secara garis besar ada dua jenis metoda pemasangan dari flowmeter yaitu *inline* dan *insertion*. Pada model Inline pemasangan membutuhkan dua buah connector untuk pipa bagian hulu (*upstream*) dan hilir (*downstream*), sedangkan model insertion pemasangannya dilakukan dengan menyisipkan sensor probe kedalam pipa.

Metode pemasangan secara insertion lebih fleksibel dan hemat, bila dipasang pada line size yang lebih besar. Pemasangan secara inline, garis tengah dari pipa harus sama dengan ukuran garis tengah flowmeter. Ada dua jenis metoda penyambungan yang banyak digunakan untuk pemasangan flowmeter secara inline dengan pipa yaitu *flanged* dan *wafer*.



Gambar 3.1. Metoda pemasangan Flowmeter

Pada umumnya pemasangan flowmeter pada suatu titik mempersyaratkan pipa pada kedua sisi flowmeter (upstream dan downstream) dipasang secara lurus pada suatu jarak tertentu. Khusus untuk alat ukur aliran jenis "pressure drop meter" kadang-kadang memerlukan pipa penyearah (straightening vane) untuk aliran dengan distribusi kecepatan abnormal. Sumber utama adanya gangguan pada profil kecepatan fluida dalam pipa adalah adanya dua elbow dan valve. Straightening vane yang diletakkan diantara elbow dan element primer efektif untuk menghilangkan putaran (swirls) pada aliran.



Gambar 3.2. Straightening Vane

3.2.3. Pemilihan (Selection)

Untuk memilih suatu flowmeter yang sesuaikan aplikasinya, banyak faktor yang perlu untuk dipertimbangkan. Yang paling utama adalah *fluid phase* (liquid, gas atau steam) dan *flow condition* (clean, dirty, viscous, abrasive, open channel, dll.).

Faktor kedua yang paling utama adalah *line size* dan *flow rate* (keduanya berhubungan erat). Informasi ini lebih banyak dapat mengeliminasi berbagai macam sub model pada setiap teknologi flowmeter.

Fluid properties lainnya mempengaruhi pemilihan dari flowmeter antara lain *density* (specific gravity), *pressure*, *temperature*, *viscosity*, and *electronic conductivity*. Informasi lainnya adalah status dari fluida (*pure* atau *mixed*) dan status dari aliran (*constant*, *pulsating* atau *variable*).



Lebih dari itu, temperatur lingkungan, lokasi pemasangan (*corrosive, explosive, indoor* atau *outdoor*), metoda instalasi (*insertion, clamped-on*, atau *inline*), dan penempatan dari flowmeter juga perlu untuk dipertimbangkan, bersama dengan faktor lain yang meliputi antara lain maksimum *pressure drop* yang diijinkan, ketelitian (*accuracy*) yang diperlukan, repeatability serta biaya (pengadaan dan pemeliharaan).

3.2.4. Sifat Fisik Fluida

Dalam menyelesaikan persoalan-persoalan mengenai aliran fluida selalu diperlukan data-data dari fluida itu sendiri, yaitu sifat-sifat fisiknya. Diantara berbagai sifat fisik fluida ada dua sifat yang paling penting, yaitu viskositas (*viscosity*) dan rapat massa (*density*).

A. Viskositas (μ)

Viskositas adalah suatu sifat fluida yang merupakan ukuran dari besarnya tahanan atau hambatan yang dialami bila fluida mengalir. Makin besar viskositas suatu fluida, maka makin besar hambatan yang dialami sehingga makin sulit fluida itu akan mengalir.

Hal ini dapat diterangkan secara matematis, yaitu hubungan antara gaya dan gradient kecepatan ditentukan oleh persamaan :

$$F/A = \mu (dv/dy)$$

Dimana :

F = Gaya yang diberikan pada pelat

A = Luas permukaan pelat

dv/dy = gradient kecepatan dalam arah y

F/A = tegangan geser

μ = konstanta kesebandingan (viskositas)

Terlihat pada persamaan di atas bahwa makin besar harga μ , makin besar gaya yang diperlukan untuk menghasilkan gradient kecepatan tertentu atau gaya yang sama akan didapat gradien kecepatan yang lebih kecil. Dari kedua hal tersebut di atas, maka dapat disimpulkan bahwa makin besar μ makin sukar fluida mengalir. Fluida yang sukar mengalir merupakan fluida yang viskos, sehingga konstanta kesebandingan ini disebut koefisien viskositas atau disebut saja viskositas.

Besarnya viskositas suatu fluida dipengaruhi oleh temperature, tekanan (pressure) dan tegangan geser yang dialami. Bila viskositas suatu fluida hanya tergantung pada temperature dan tekanan maka fluida tersebut disebut fluida Newtonian. Bila temperature dinaikkan, maka viskositas cairan akan berkurang sedangkan viskositas gas akan bertambah. Menaikkan tekanan akan memperbesar baik viskositas cairan maupun viskositas gas. Umumnya viskositas



gas lebih peka terhadap perubahan tekanan dibandingkan dengan cairan, tetapi kurang peka terhadap perubahan temperature.

a. Viskositas Dinamik (Absolut)

Viskositas yang dijelaskan di atas adalah viskositas dinamik dan menurut defenisi dari persamaan 4.1.

$$\mu = \frac{F/A}{(dv/dy)}$$

Mempunyai satuan : *dyne.detik / cm²* atau *gram / cm.detik*, di dalam prakteknya satuan untuk viskositas dinamik biasanya dinyatakan dengan poise atau centipoises, dimana :

$$1 \text{ poise} = 100 \text{ centipoise} = 1 \text{ dyne.detik / cm}^2$$

b. Viskositas Kinematik

Viskositas kinematik didefinisikan sebagai :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Dimana :

- ν = viskositas kinematik
- μ = viskositas dinamik (absolute)
- ρ = rapat massa (density)

Dalam prakteknya viskositas kinematik ini sering dinyatakan dengan satuan stoke, dimana :

$$1 \text{ stoke} = 100 \text{ centistoke} = 1 \text{ cm}^2/\text{detik}$$

Dari definisi satuan centipoises dan centistokes, maka didapatkan hubungan :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu}{SG}$$

Dimana :

- SG = berat jenis (*specific gravity*)



Didalam prakteknya viskositas suatu fluida dapat ditentukan dengan menggunakan grafik, nomogram atau table yang sudah ada asalkan kondisinya diketahui.

B. Rapat Massa (density)

Rapat massa dari suatu fluida merupakan ukuran dari banyak massa pada temperature dan tekanan tertentu yang ditempatkan di dalam satu volume.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Dimana :

- ρ = rapat massa (density)
- m = massa
- V = volume

C. Berat Jenis (specific gravity)

Rapat massa suatu fluida sering juga dinyatakan dengan berat jenis (specific gravity), yaitu perbandingan anatar rapat massa suatu fluida dan rapat massa fluida yang dipilih sebagai fluida standard. Untuk cairan biasanya menggunakan air sebagai fluida standard sedangkan untuk gas digunakan udara.

- **Berat Jenis (Specific Gravity) Cairan**

$$SG_{\text{liquid}} = \frac{\rho_{\text{liquid}}}{\rho_{\text{water}}}$$

- **Berat Jenis (Specific Gravity) Gas**

$$SG_{\text{gas}} = \frac{\rho_{\text{gas}}}{\rho_{\text{air}}}$$

D. Bilangan Reynold

Penelitian-penelitian yang dilakukan oleh Osborne Reynold menunjukkan bahwa bentuk aliran fluida didalam pipa yaitu **laminar**, **transitional**, atau **turbulent** tidak hanya tergantung pada kecepatan (free-stream fluid velocity) (V) saja, tetapi juga tergantung pada diameter pipa (characteristic distance) (D), rapat massa (fluid density) (ρ) dan fluid viscosity (dynamic) (μ). Bentuk aliran



didasarkan pada kombinasi dari parameter tersebut yang menghasilkan suatu konstanta tak berdimensi yang disebut bilangan Reynold (Re). Bilangan Reynold ini didefinisikan sebagai :

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

Dimana :

- ρ = rapat massa (lbm/cu.ft)
- v = kecepatan aliran (ft/sec atau fps)
- D = diameter pipa (ft)
- μ = viskositas absolute fluida (lbm/ft/sec)

Untuk keperluan teknik, aliran dimana :

- Reynolds Number < 2000 dikategorikan sebagai bentuk aliran laminar
- $2000 \leq$ Reynolds Number \leq 4000 dikategorikan sebagai bentuk aliran transitional
- Reynolds Number > 4000 dikategorikan sebagai bentuk aliran turbulen.

3.2.5. Alat Ukur Aliran Fluida

Acuan secara umum untuk pengukuran aliran (flow measurement) adalah *API RP 550, "Manual on Installation of Refinery Instrument and Control System". Part 1, "Process Instrumentation and Control". Section 1, "Flow"*.

Di dalam pemilihan alat ukur flow (*flow measuring device*), berikut kondisi-kondisi yang sangat berpengaruh dan harus diketahui untuk perhitungan, antara lain :

1. Ukuran pipa dimana laju aliran diukur (*Line Size*)
2. Daerah laju aliran (*Range of flow rates*) ; maximum, normal dan minimum
3. Karakteristik fluida (*fluid properties*) :
 - *Liquid, gas, slurry, dll.*
 - *Pressure*
 - *Temperature*
 - *Viscosity*
 - *Specific gravity at standard and flowing conditions*
 - *Compressibility*
 - *Molecular weight (for gases and vapors)*
 - *Steam quality (for steam)*

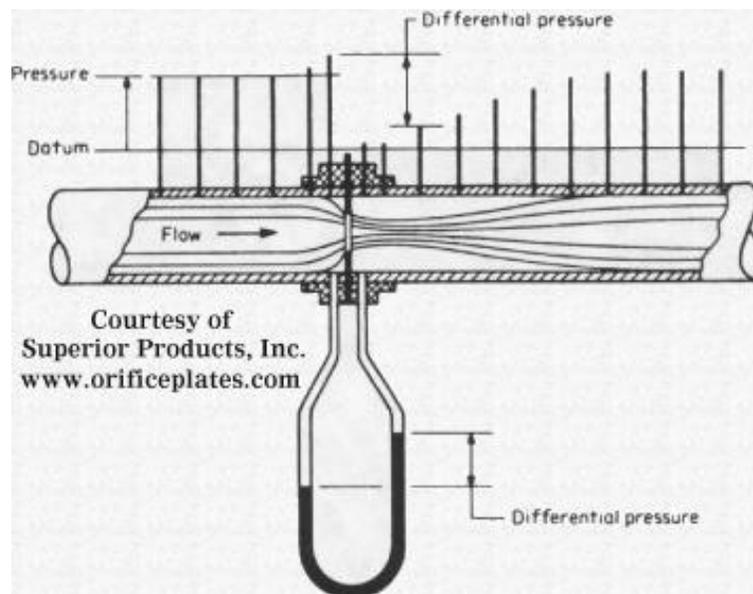
4. Pengaruh korosif (untuk membantu didalam pemilihan material)
5. Apakah aliran yang diukur adalah aliran yang stabil atau aliran fluktuasi.

A. Differential Pressure Flowmeters (Head Flow Meter)

1. Prinsip Operasi

Prinsip operasi *Differential Pressure Flowmeters (DP Flowmeters)* di dasarkan pada persamaan **Bernoulli** yang menguraikan hubungan antara tekanan dan kecepatan pada suatu aliran fluida.

Alat ini memandu aliran ke dalam suatu penghalang aliran (yang mempunyai lubang dengan diameter yang berbeda dengan diameter pipa), sehingga menyebabkan perubahan kecepatan aliran (*flow velocity*) dan tekanan (*pressure*) antara sisi upstream dan downstream dari penghalang. Dengan mengukur perubahan tekanan tersebut, maka kecepatan aliran dapat dihitung.



Gambar 3.3. Differential Pressure Flowmeters (DP Flowmeters)

2. Spesifikasi Umum

Differential pressure atau head flow measurement merupakan metoda pengukuran flow yang paling populer saat ini untuk mengukur aliran fluida di industri proses.



Fluid Phase:

Score	Phase	Condition
☑	Cryogenic	
☑	Gas	Clean
☑		Dirty
☑	Liquid	Clean
☑		Dirty
☑		Viscous
☑	Steam	Saturated
☑		Superheated
☑	Liquid	Corrosive
☑	Slurry	Abrasive

☑ : Recommended
☑ : Limited applicability

Line Size: 6 ~ 300 mm (1/4 ~ 12 inch)

Turndown Ratio: 10 : 1

3. Kelebihan dan Kekurangan

Kelebihan

1. Biaya pengadaannya awal : rendah ~ sedang
2. Dapat digunakan di dalam cakupan luas (hampir semua phase fluida dan kondisi aliran).
3. Strukturnya kokoh dan sederhana

Kekurangan

1. Rugi tekanan (pressure drop) : sedang ~ tinggi

4. Primary Elements untuk DP Flowmeters

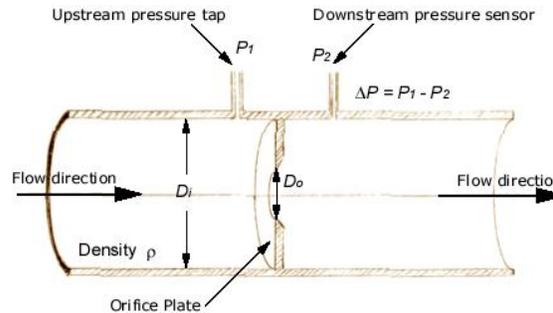
Berbagai jenis primary element yang tersedia dipasaran untuk DP flowmeters antara lain : orifice plates, venturi tube, flow nozzle, pitot tube, anubar tubes, elbow taps, segmental wedge, V-Cone dan Dall Tube.

Jenis yang paling banyak digunakan adalah orifice plate, namun element lain menawarkan beberapa kelebihan untuk aplikasi tertentu. Kelebihan dan kekurangan untuk berbagai jenis element tersebut dapat dilihat di bawah.

a. Orifice Plates

Suatu plate berlubang dimasukkan ke dalam pipa dan ditempatkan secara tegak lurus terhadap flow stream. Ketika fluida mengalir melewati orifice plate tersebut maka menyebabkan peningkatan kecepatan dan penurunan

tekanan. Perbedaan tekanan sebelum dan setelah orifice plate digunakan untuk mengkalkulasi kecepatan aliran (flow velocity).



Gambar 3.4. Orifice Plates

1) Orifice Plate Plate Calculation

Kalkulasi untuk orifice plate mengacu pada standard :

- API "Manual of Petroleum Measurement Standards", Chapter 14.3 ANSI/API 2530 (AGA Gas Measurement Committee Report No. 31).
- L.K. Spink, "Principles and Practice of Flow Meter Engineering, ninth edition. L.K. Spink sekarang ini tidak diterbitkan lagi dan digantikan oleh R.W. Miller, "Flow Measurement Engineering Handbook", first edition, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, U.S.A.

Persamaan Bernoulli : Hukum kekekalan energi menyatakan bahwa bila tidak ada perpindahan panas dan kerja yang dilakukan, maka energi fluida disetiap titik sepanjang pipa akan tetap konstan. Dari prinsip kekekalan energi ini dapat diturunkan persamaan Bernoulli.

Persamaan energi aliran persatuan volume untuk fluida yang tidak termampatkan (*incompressible*), adalah :

$$\frac{1}{2} \rho V^2 + P_s + \rho g h = \text{konstant}$$

Suatu aliran fluida yang melewati suatu penghalang orifice plate akan mengalami penurunan tekanan (*pressure drop*) pada orifice tersebut. Perubahan ini dapat digunakan untuk mengukur flowrate dari suatu fluida.

Untuk mengkalkulasi flowrate dari suatu aliran fluida yang melintas suatu orifice plate, maka sepanjang kecepatan aliran fluida adalah di bawah kecepatan subsonic ($V < \text{mach } 0.3$), maka persamaan *Incompressible Bernoulli's* di atas dapat digunakan, sehingga :

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho V_2^2 - \frac{1}{2} \rho V_1^2$$



Dimana lokasi 1 adalah hulu (*upstream*) dari orifice, dan lokasi 2 adalah hilir (*downstream*) dari orifice.

Persamaan Kontinuitas : persamaan ini menyatakan bahwa banyaknya fluida yang memasuki penampang 1 (Q_1) sama dengan banyaknya fluida yang keluar penampang 2 (Q_2) , yang berarti :

$$V_1 A_1 = V_2 A_2$$

Dari persamaan *Persamaan Bernoulli* dan *Persamaan Kontinuitas* dapat diturunkan persamaan yang menghubungkan antara debit aliran (Q) dengan beda tekanan statis antara upstream dan downstream ($p_1 - p_2$). Total head pada kedua tempat tersebut sama.

Untuk fluida yang tidak termampatkan, hubungan antara laju aliran (Q) yang diukur dengan beda tekanan ($p_1 - p_2$) adalah :

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho Q^2 \frac{1}{A_2^2} \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]$$

Pemecahan untuk flowrate volumetric (Q), adalah :

$$Q = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \frac{A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2}}$$

Persamaan di atas hanya dapat diaplikasikan untuk aliran yang sempurna (*laminar, inviscid* atau *non viscous*). Untuk aliran yang real (seperti air atau udara), karakteristik viscosity dan turbulence berpengaruh dan mengakibatkan konversi energi kinetik ke dalam panas. Untuk efek tersebut, suatu *discharge coefficient* (C_d) diperkenalkan ke dalam persamaan tersebut di atas untuk secara garis besar mengurangi flowrate (Q).

$$Q = C_d \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \frac{A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2}}$$

Oleh karena profil aliran yang nyata pada lokasi 2 (downstream) dari orifice adalah sangat kompleks, maka dengan demikian dibuat suatu nilai yang efektif untuk mengganti A_2 yang tidak pasti, yaitu flow coefficient (C_f),

$$C_f A_o = C_d \frac{A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2}}$$



Dimana A_o adalah dari orifice. Sebagai hasilnya, persamaan *flowrate volumetric* (Q) untuk flow yang real, adalah :

$$Q = C_f A_o \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

Flow coefficient (C_f) didapatkan dari eksperimen (dapat dilihat pada table yang sudah disusun pada buku-buku reference), nilai C_f terbentang dari 0.6 sampai 0.9 untuk kebanyakan jenis orifice. Oleh karena itu tergantung pada orifice dan diameter pipa (seperti halnya Reynolds Nomors). Biasanya di dalam table C_f adalah perbandingan diameter orifice dan diameter inlet pipa, kadang-kadang didefinisikan sebagai β , yaitu :

$$\beta = \frac{D_o}{D_{inlet}}$$

Mass flowrate (Q_{mass}) dapat ditentukan dengan perkalian *flowrate volumetric* (Q) dengan fluid density (ρ), yaitu :

$$Q_{mass} = \rho Q$$

Catatan :

- General Process Flow Measurement :
 β ratio = d / D , didalam batas 0.25 – 0.75
- Custody Transfer Flow Measurement :
 β ratio = d / D , didalam batas 0.4 – 0.6 (lebih disukai mendekati 0.5)

Untuk fluida yang termampatkan (*compressible*), berlaku hubungan sebagai berikut :

$$G = \frac{C_d A_2 Y}{\sqrt{1 - (A_2 / A_1)^2}} \sqrt{2 \rho (p_1 - p_2)}$$

Dimana :

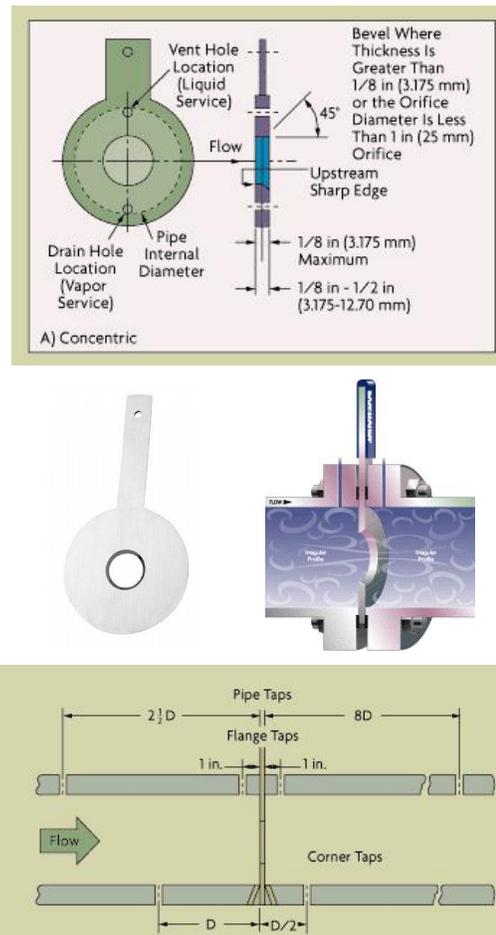
G = Laju aliran massa

Y = Faktor ekspansi, tergantung pada kalor jenis dan tekanan fluida.

2) Jenis-jenis Orifice Plate

• **Concentric Orifice**

Letak lubang penghalang konsentris dengan penampang pipa. Digunakan untuk mengukur volume gas, liquid dan steam dalam jumlah yang besar.



Gambar 3.5. Orifice Plate jenis Concentric

Kelebihan

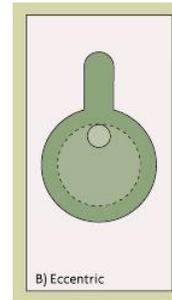
- Dapat digunakan pada berbagai ukuran pipa (range yang lebar).
- Ketelitian (accuracy) baik, jika plate dipasang dengan baik.
- Harga relative murah.

Kekurangan

- Rugi tekanan (pressure drop) relatif tinggi.
- Tidak dapat digunakan untuk mengukur laju aliran "slurry", karena cenderung terjadi penyumbatan.

- **Eccentric Orifice**

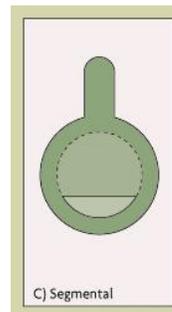
Titik pusat lubang penghalang tidak satu garis pusat dengan pusat penampang pipa. Pemasangan lubang yang tidak konsentris ini dimaksud untuk mengurangi masalah jika fluida yang diukur membawa berbagai benda padat (solid).



Gambar 3.6. Eccentric Orifice

- **Segmental Orifice**

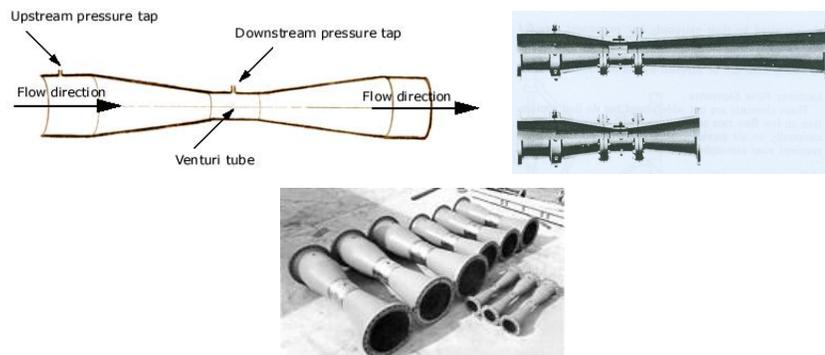
Segmental orifice plates digunakan terutama pada service yang sama dengan eccentric orifices, sehingga kelebihan dan kekurangan adalah kurang lebih sama.



Gambar 3.7. Segmental Orifice

b. Venturi Tube

Bentuk dari venturi tube dapat dilihat pada gambar 3.8. Perubahan di (dalam) area / luas penampang menyebabkan perubahan kecepatan dan tekanan dari aliran (flow).



Gambar 3.8. Venturi Tubes

Secara umum kelebihan dan kekurangan dari penggunaan Venturi Tube, adalah sebagai berikut :

Kelebihan

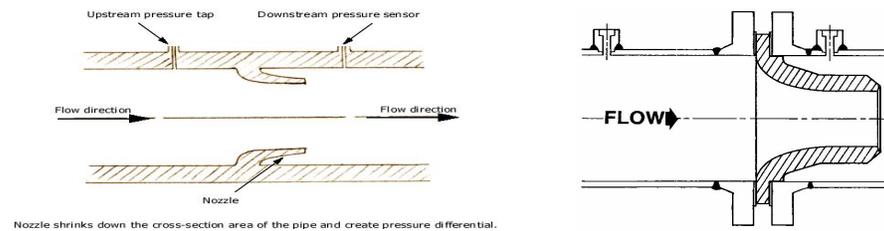
- Rugi tekanan (pressure loss) permanen relatif rendah dari pada orifice atau flow nozzle
- Dapat digunakan untuk mengukur cairan yang mengandung endapan padatan (solids).

Kekurangan

- Tidak tersedia pada ukuran pipa dibawah 6 inches.
- Harga relatif mahal.

c. Flow Nozzle

Gambar 3.9. memperlihatkan flow nozzle. Alat ini terdiri dari bagian yang berbentuk lonceng dengan profile ellips diikuti dengan leher silindris dan diletakkan di dalam pipa untuk merubah bidang aliran sehingga menghasilkan penurunan tekanan (pressure drop) untuk digunakan menghitung flow velocity.



Gambar 3.9. Flow Nozzles

Kelebihan

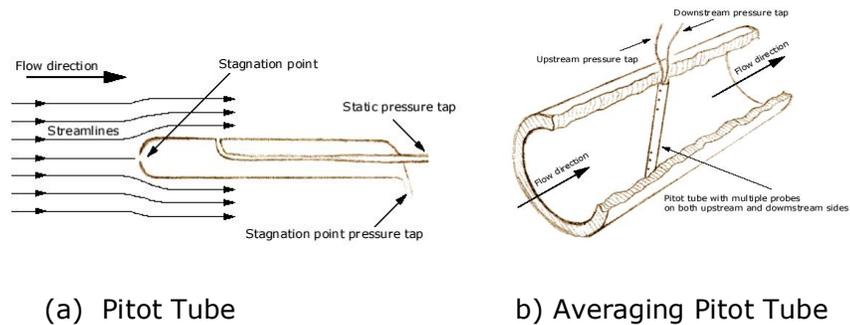
- Pressure loss lebih rendah dibandingkan orifice plate.
- Dapat digunakan untuk fluida yang mengandung padatan (solids).

Kekurangan

- Terbatas pada ukuran pipa di bawah 6 ".
- Harga lebih tinggi dibanding dengan orifice.

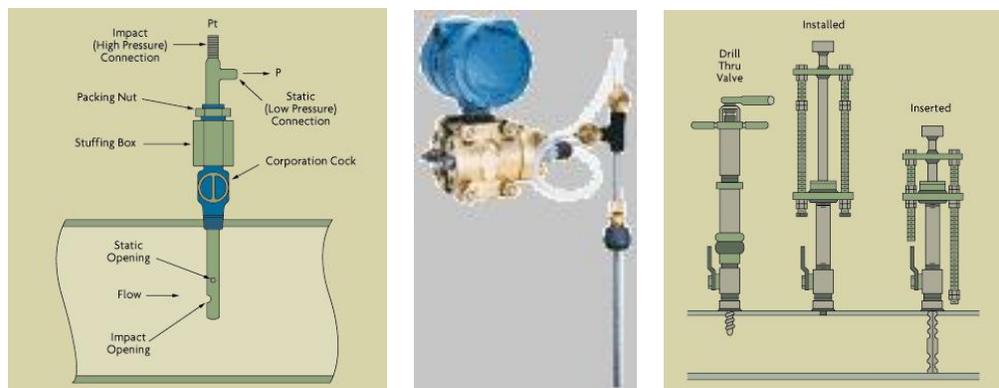
d. Pitot Tubes

Sebuah probe dengan open tip (pitot tube) dimasukkan ke dalam suatu bidang aliran (flow), dimana tip tersebut sebagai titik stationary (zero velocity) dari flow. Tekanan nya, dibandingkan dengan tekanan statis dan digunakan untuk mengkalkulasi kecepatan aliran (flow velocity) Pitot tabung dapat mengukur flow velocity pada titik pengukuran.



Gambar 3.10. Pitot Tube dan Averaging Pitot Tube

Pitot tube jarang digunakan pada process stream tetapi umumnya digunakan pada utilities streams dimana ketelitian (accuracy) yang tinggi tidaklah diperlukan.



Gambar 3.11. Pitot Tube

Kelebihan

- Tidak ada pressure loss.

Kekurangan

- Akurasi kurang.
- Tidak direkomendasikan untuk fluida yang kotor dan lengket.
- Sensitif pada gangguan pada hulu (upstream)

e. Annubar Tubes

Karakteristik annubar element hampir sama dengan pitot tube, namun akurasi yang dihasilkan lebih baik dari pitot tube.



Gambar 3.12. Annubar Tube

Kelebihan

- Pressure drop dapat diabaikan.
- Dapat dipasang untuk service dengan tekanan rendah.

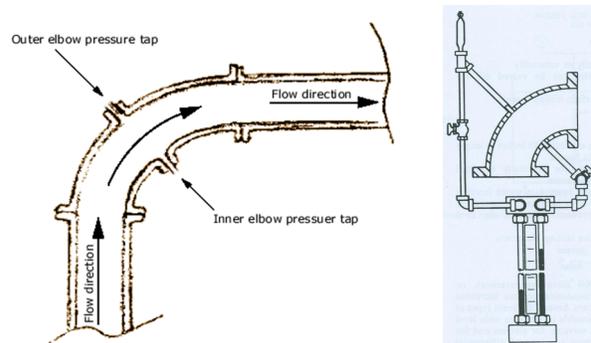
Kekurangan

- Tidak dapat diaplikasikan untuk fluida yang kotor dan lengket.

f. Elbow Taps

Ketika suatu aliran cairan melalui sebuah elbow, maka gaya sentrifugal menyebabkan perbedaan tekanan antara sisi sebelah luar dan sisi sebelah dalam dari elbow itu. Perbedaan tekanan ini digunakan untuk menghitung kecepatan aliran (*flow velocity*).

Kekurangan alat ukur ini adalah perbedaan tekanan yang dihasilkan oleh suatu elbow flowmeter adalah lebih kecil dibanding dengan DP flowmeter lainnya, namun kelebihan elbow flowmeter mempunyai lebih sedikit penghalang pada aliran fluida.

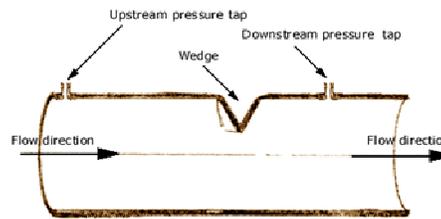


Gambar 3.13. Elbow Flowmeter

Elbow taps flowmeter pada gambar di atas sangat jarang digunakan, namun aplikasi alat ukur ini akan bermanfaat bilamana pengukuran flow diperlukan di dalam suatu instalasi yang sudah ada (existing), dimana biaya yang tersedia rendah dan ketelitian yang baik tidak diutamakan.

g. Segmental Wedge

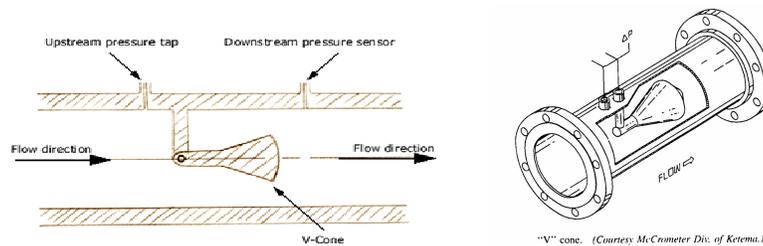
Perubahan segmen (wedge-shaped) pada area / luas penampang dari aliran fluida menciptakan pressure drops yang digunakan untuk mengkalkulasi kecepatan aliran fluida.



Gambar 3.14. Segmen Wedge

h. V-Cone

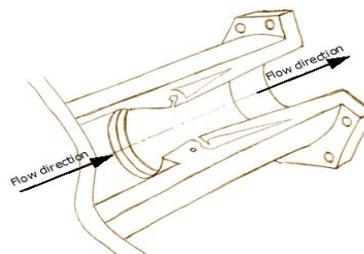
Suatu kerucut sebagai elemen penghalang yang bertindak memodifikasi penampang dari aliran fluida dan ditempatkan di pusat dari pipa untuk menghasilkan perbedaan tekanan yang digunakan untuk menghitung kecepatan fluida.



Gambar 3.15. V- cone

i. Dall Tube

Suatu kombinasi dari Venturi tube dan orifice plate. Alat ini umumnya digunakan untuk aplikasi dengan laju aliran yang besar.



Gambar 3.16. Dall Tube



B. Variable Area Flowmeter (Rotameters)

1. Prinsip Operasi

Prinsip operasi dari *rotameter* (*variable area meters*) didasarkan pada pelampung (*float*) yang berfungsi sebagai penghalang aliran, pelampung tersebut akan melayang dalam suatu tabung yang mempunyai luas penampang tidak konstan. Luas penampang tabung berubah tergantung ketinggiannya (semakin tinggi semakin besar).

Posisi pelampung akan menyatakan harga aliran fluida yang mengenainya. Pada posisi tersebut pada pelampung akan terjadi keseimbangan gaya, yaitu keseimbangan antara berat pelampung dengan gaya tarik aliran yang mengenainya dan gaya apung pelampung.

$$Q = C \bar{A}_b \sqrt{\frac{2g \left[\frac{V_f (\rho_f - \rho)}{A_f} - \rho h_f \right]}{\rho \left[1 - \left(\frac{\bar{A}_b}{A_a} \right)^2 \right]}}$$

Dimana :

- C = **discharge coefficient**, tergantung pada **Reynolds Number** dari flow
- A_a = cross section area at a
- A_b = cross section area at b.
- g = gravity acceleration constant (9.81 m/s² or 32.2 ft/s²)
- ρ = density of the fluid
- V_f = volume of the float
- A_f = cross section area of the float
- ρ_f = density of the float

Mass flow rate dapat dihitung dengan mengalikan Q dengan fluid density ρ ,

$$Q_{\text{mass}} = \rho Q$$



Gambar 3.17. Rotameters atau variable area meters



2. Spesifikasi Umum

Rotameters telah digunakan secara luas untuk mengukur flow pada pipa ukuran kecil (line size < 4 inches). Rangeability 10 ~ 100 : 1.

Fluid Phase:

Score	Phase	Condition
👍	Gas	Clean
👍	Liquid	Clean
👍		Open Channel
👎	Gas	Dirty
👎	Liquid	Corrosive
👎		Dirty
👎	Steam	Saturated

👍: Recommended

👎: Limited applicability

Line Size: Mostly used in lines size 100 mm (4 inch) and below, but may go up to 2000 mm (80 inch) in line size or even for open channels.

Turndown Ratio: 10 ~ 100 : 1

3. Kelebihan dan Kekurangan

Kelebihan

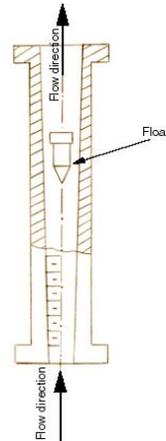
- Biaya pengadaannya awal : rendah
- Rangeability baik.
- Pressure drop rendah (hampir konstan)

Kekurangan

- Untuk jenis glass tube mudah mengalami kerusakan (pecah).
- Tidak baik untuk laju aliran (flow rate) rendah
- Tidak baik untuk service fluida yang fluktuasi.
- Harus dipasang secara vertical.
- Beberapa variable area meter tidak bisa digunakan di dalam lingkungan gaya berat yang rendah.
- Secara umum dibatasi pada ukuran pipa kecil (kecuali jika bypass rotameter digunakan).

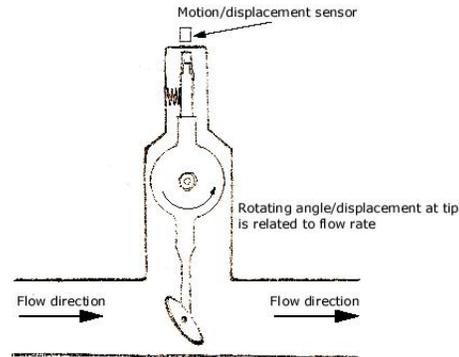
4. Jenis-jenis Variable Area flowmeters

a. Rotameters



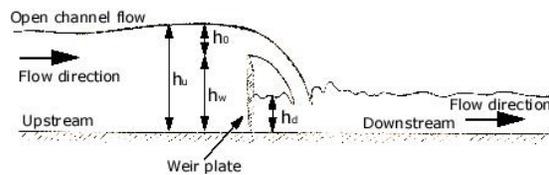
Gambar 3.18. Rotameters

b. Movable Vane Meter



Gambar 3.19. Movable Vane Meter

c. Weir, Flume



Gambar 3.20. Weir, Flume



C. Positive Displacement Flowmeters

1. Prinsip Operasi

Positive Displacement Flowmeters (PD meters), bekerja berdasarkan pengukuran volume dari fluida yang sedang mengalir dengan menghitung secara berulang aliran fluida yang dipisahkan kedalam suatu volume yang diketahui (*chamber*), selanjutnya dikeluarkan sebagai volume tetap yang diketahui.

Bentuk dasar dari *PD meter* adalah suatu chamber yang berfungsi memisahkan atau menghalangi aliran fluida. Di dalam chamber tersebut terdapat sebuah alat mekanik yaitu *rotating/reciprocating unit* yang ditempatkan untuk menciptakan paket volume tetap dari fluida yang sedang mengalir.

Oleh karena itu, volume dari fluida yang melewati chamber dapat diketahui dengan menghitung jumlah *discrete parcels* yang lewat atau setara dengan jumlah putaran dari *rotating / reciprocating*. Dengan demikian *volume flow rate* dapat dihitung dari laju perputaran alat *rotating / reciprocating*.

2. Spesifikasi Umum

Akurasi dari PD flowmeter ditentukan oleh kemampuan *capillary seal* untuk memisahkan fluida yang masuk kedalam chamber dalam bentuk *discrete parcels*.

Dalam upaya memastikan PD meter berfungsi dengan baik dan mencapai tingkat akurasi (*design*), maka didalam implementasinya PD meter dilengkapi dengan filter yang berfungsi memisahkan partikel (dengan ukuran $>100 \mu\text{m}$) dan gelembung gas (*bubbles*) dari aliran fluida.

Walaupun flowmeter jenis ini sudah digunakan secara luas di dalam industri, namun potensi sebagai penyebab *pressure drop* perlu dipertimbangkan pada semua aplikasi.

Fluid Phase:

Score	Phase	Condition
	Liquid	Clean
		Viscous
	Liquid	Corrosive
		Dirty

: Recommended
: Limited applicability

Line Size: 6 ~ 300 mm (1/4 ~ 12 inch)

Turndown Ratio: 5 ~ 15 : 1, might go as high as 100 : 1

3. Kelebihan dan Kekurangan

Secara umum kelebihan dan kekurangan dari PD flowmeter adalah sebagai berikut :

Kelebihan

- Biaya pengadaannya awal : rendah ~ sedang
- Dapat digunakan di dalam aliran viscous.
- Rangeability yang tinggi
- Output pembacaan linear.
- Akurasi sangat bagus.

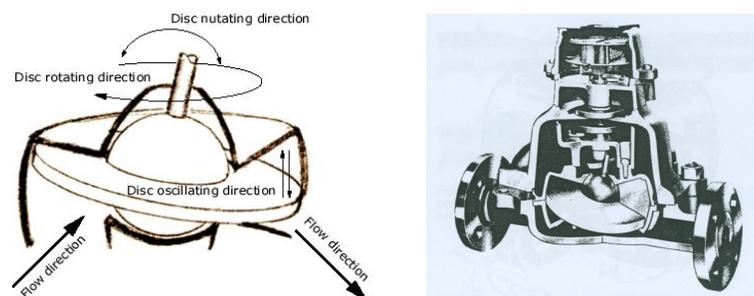
Kekurangan :

- Biaya pemeliharaan relatif tinggi
- Pressure drop relatif tinggi
- Tidak sesuai untuk laju alir rendah
- Sangat peka pada kerusakan akibat gas, fluida dengan padatan (slugs) dan fluida yang kotor.
- Gas (bubbles) didalam fluida signifikan menurunkan akurasi.

4. Jenis-jenis Positive Displacement Flowmeters

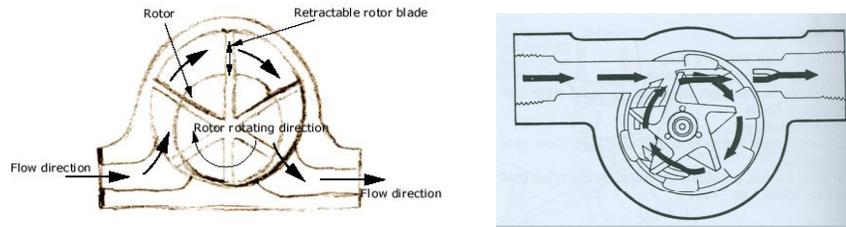
Beberapa jenis positive displacement flowmeter yang tersedia dan digunakan secara luas di dalam industri proses, antara lain ; *nutating disc, rotating valve, oscillating piston, oval gear, roots (rotating lobe), birotor, rotating impeller, reciprocating piston* dan *rotating vane*. Perbedaan penamaan hanya didasarkan pada bentuk alat mekanis di dalam chamber, namun prinsip operasi untuk pengukuran volumetric flow adalah sama.

a. Nutating Disc



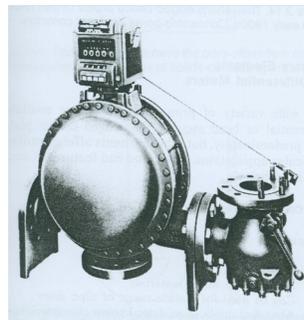
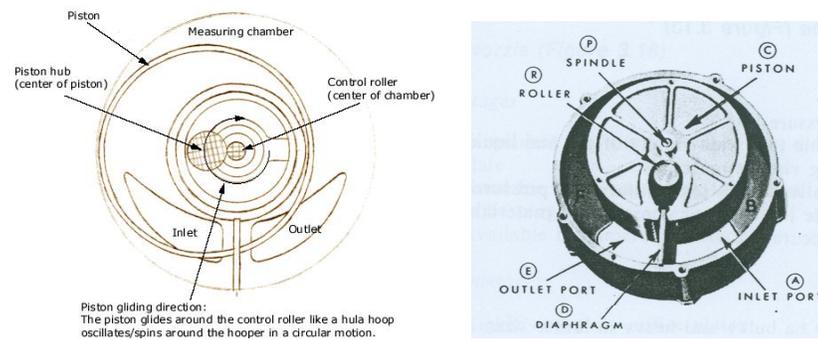
Gambar 3.21. Nutating Disc

b. Rotating Valve



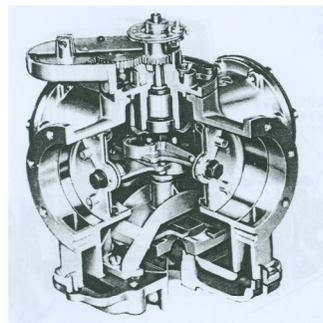
Gambar 3.22. Rotating Valve

c. Oscillating Piston



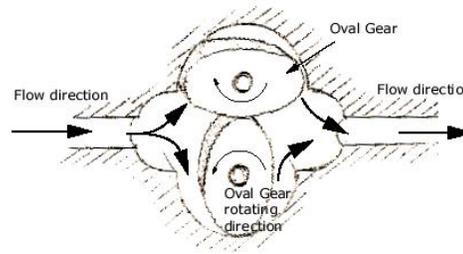
Gambar 3.23. Oscillating Piston

d. Reciprocating Piston



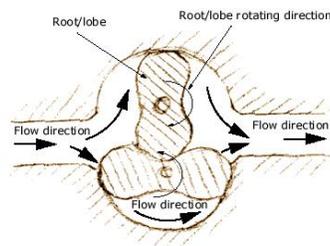
Gambar 3.24. Reciprocating Piston

e. Oval Gear



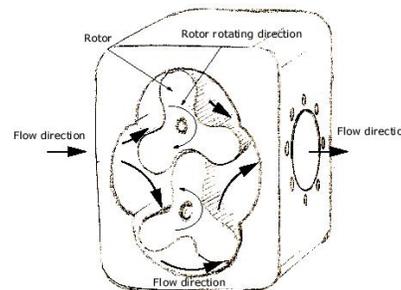
Gambar 3.25. Rotating Vane

f. Roots (Rotating Lobe)



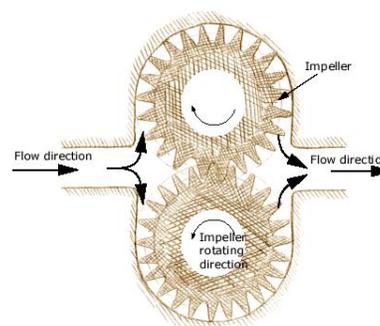
Gambar 3.26. Rotating Lobe

g. Birotor



Gambar 3.27. Birotor

h. Rotating Impeller



Gambar 3.28. Birotor

D. Magnetic Meters

1. Prinsip Operasi

Magnetic flowmeter (mag flowmeter) adalah suatu *volumetric flow meter* yang tidak mempunyai bagian yang bergerak (*moving part*) dan ideal untuk aplikasi air limbah (*wastewater*) atau cairan kotor yang konduktif listrik.

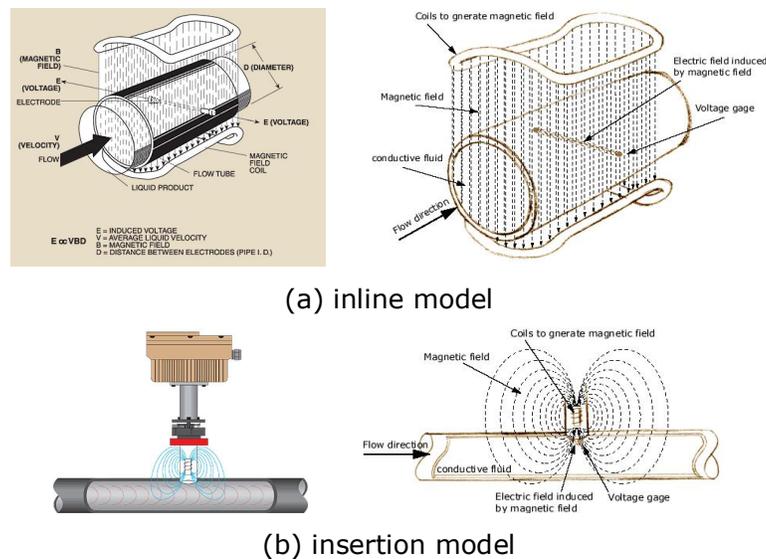
Secara umum magnetic flowmeter tidak berfungsi pada fluida hidrokarbon dan air suling (*distilled water*), namun ideal untuk mengukur aliran fluida seperti slurry dan material korosif. Flowmeter jenis ini sangat ideal untuk aplikasi dimana disyaratkan pressure drop rendah dan maintenance yang rendah.

Prinsip kerja flowmeter jenis ini didasarkan pada hukum induksi elektromagnetik (*Faraday's Law*), yaitu bila suatu fluida konduktif elektrik melewati pipa transducer, maka fluida akan bekerja sebagai konduktor yang bergerak memotong medan magnet yang dibangkitkan oleh kumparan magnetic dari transducer, sehingga timbul tengangan listrik induksi. Hubungan ini dapat dinyatakan sebagai :

$$e = B \cdot l \cdot v$$

Dimana :

- e = tegangan listrik induksi
- B = rapat fluksi medan magnet
- l = panjang konduktor (diameter dalam pipa)
- v = kecepatan konduktor (laju aliran)



Gambar 3.29. Prinsip operasi dari model magnetic flowmeter



Gambar 3.29 di atas, memperlihatkan dua bentuk mag flowmeter yaitu :

- **Inline model** ; menempatkan electric coil di sekeliling pipa dan disediakan sepasang electroda berseberangan pada dinding pipa.
- **Insertion model** ; menyisipkan electric coil ke dalam pipa yang akan diukur flow-nya dan disediakan sepasang electroda di ujung dari flowmeter.

2. Spesifikasi Umum

Spesifikasi umum dari magnetic flowmeter, adalah sebagai berikut :

Fluid Phase:

Score	Phase	Condition
🟢	Liquid	Clean
🟢		Corrosive
🟢		Dirty
🟢		Viscous
🟢	Slurry	Abrasive
🟢		Fibrous
🟡	Liquid	Non-Newtonian
🟡		Open Channel

🟢: Recommended

🟡: Limited applicability

Line Size:

Inline models: 10 ~ 1200 mm (0.4 ~ 48 inch)
Insertion models: 75 mm (3 in) and up

Turndown Ratio: 100: 1



Gambar 3.30. Magnetic flowmeters

3. Kelebihan dan Kekurangan

Kelebihan

- Pressure drop minimum, oleh karena penghalang yang minimum pada lintasan flow.
- Biaya maintenance rendah sebab tidak ada moving parts.
- Linearitas yang tinggi.

- Dapat digunakan untuk mengukur fluida yang korosif dan slurry.
- Pengukuran tidak dipengaruhi oleh viscosity, density, temperature dan pressure.
- Dapat mengukur aliran fluida jenis turbulente atau laminar.

Kekurangan

- Dalam banyak kasus, persyaratan electrical conductivity dari fluida yang ditetapkan pabrik (0.1 – 20 micromhos).
- Zero drifting pada kondisi tidak ada flow atau low flow → problem ini pada disain baru ditingkatkan dengan memotong (cut-off) low flow.

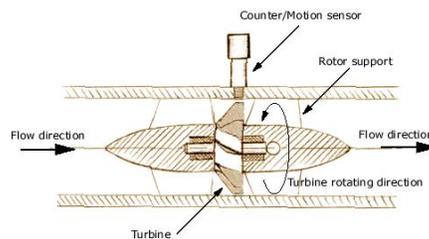
E. Turbine Meters

1. Prinsip Operasi

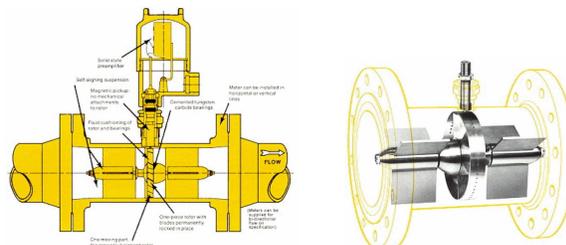
Teori dasar pada turbine meters adalah relatif sederhana, yaitu aliran fluida melalui meter berbenturan dengan turbine blade yang bebas berputar pada suatu poros sepanjang garis pusat dari turbin housing.

Kecepatan sudut (angular velocity) dari turbine rotor adalah berbanding lurus dengan laju aliran (fluid velocity) yang melalui turbine. Keluaran dari meter diukur oleh electrical pickup yang dipasang pada meter body. Frekwensi keluaran dari electric pickup adalah sebanding dengan laju aliran (flow rate).

Accuracy dan rangeability dari alat ukur turbine meter tersebut sangat baik. Rangeability bervariasi dari 100 : 1 s/d 200 : 1. Accuracy sekitar : ± ¼ s/d ± ½ %.



$$Q = VA = \frac{\omega(r)^2 A^2}{rA \tan \beta - 0.037 Re^{-0.2} n(R + \alpha) S \sin \beta}$$





Gambar 3.31. Turbine flowmeters

2. Spesifikasi Umum

Spesifikasi umum dari turbine flowmeter, adalah sebagai berikut :

Fluid Phase:

Score	Phase	Condition
☑	Gas	Clean
☑	Liquid	Clean
☹	Liquid	Corrosive
☹		Open Channel

☑: Recommended
☹: Limited applicability

Line Size: Inline models: 6 ~ 100 mm (0.25 ~ 4 inch)
Insertion models: 64 ~ 1500 mm (2.5 ~ 60 inch)

Turndown Ratio: 100 ~ 200 : 1

3. Parameters Turbine Meter

Terminologi yang secara luas digunakan dalam aplikasi turbine meter, yaitu :

Accuracy

Akuran ketelitian atau ketepatan alat ukur dalam memberikan hasil bacaan. Besaran ini menunjukkan banyaknya penyimpangan yang terjadi pada sebuah alat ukur, atau system pengukuran.

Repeatability

Kemampuan suatu unit instrument atau alat ukur untuk mendapatkan hasil baca yang sama pada beberapa kali pengukuran proses variable yang sama.

Rangability

Perbandingan antara flow maksimum dan flow minimum yang dapat dikendalikan.

4. Kelebihan dan Kekurangan

Kelebihan

- Biaya pengadaannya awal : sedang
- Akurasi baik, handal dan proven technology
- Repeatability yang sempurna
- Rangeability yang sempurna
- Pressure drop rendah

Kekurangan

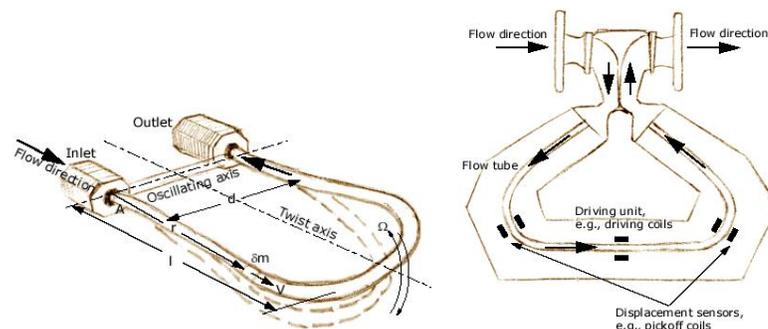
- Hanya untuk aplikasi fluida yang bersih
- Pada nonlubrication fluids kadang-kadang menimbulkan masalah.
- Dibutuhkan pipa straight runs ($15 \times D$) pada upstream turbine meter.
- Direkomendasikan menggunakan strainer.

F. Coriolis Flowmeters

1. Prinsip Operasi

Coriolis flowmeter (diambil dari nama ahli matematika France, Gustave-Gaspard Coriolis, 1835) adalah teknologi flowmeter yang relatif baru dibandingkan dengan teknologi flowmeter yang lain, dan digunakan untuk mengukur aliran massa (mass flow) secara langsung dengan accuracy dan rangeability yang tinggi. Teknologi ini dikembangkan dan diaplikasikan pada industri pada awal tahun 1980.

Prinsip Coriolis menyatakan bahwa jika sebuah partikel di dalam suatu gerak berputar mendekati atau menjauhi pusat perputaran, maka partikel menghasilkan gaya internal yang bekerja pada partikel itu.



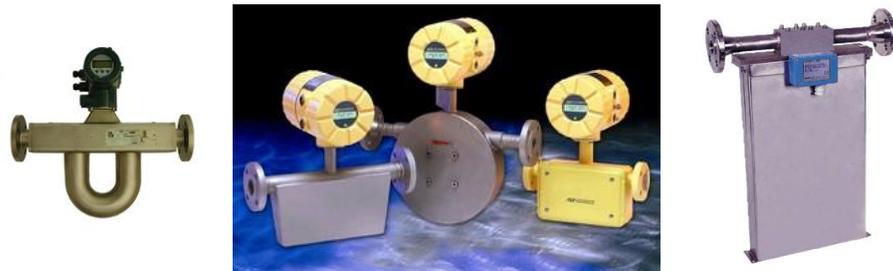
Gambar 3.32. Prinsip Operasi Coriolis Flowmeter

Andaikan fluida sedang mengalir ke dalam U-Shaped tube pada kecepatan V dan tabung sedang bergetar pada kecepatan sudut Ω , maka dengan mempertimbangkan suatu bagian yang kecil dari fluida pada bagian inlet masuk dengan jarak r , maka suatu Gaya (dikenal sebagai coriolies force) dihasilkan ;

$$\delta \vec{F}_c = \delta m \cdot a_c = \delta m \cdot 2\vec{\Omega} \times \vec{V}$$

Coriolis mass flowmeter menciptakan suatu gerak berputar dengan menggetarkan suatu tabung yang membawa fluida, dan gaya internal yang dihasilkan adalah sebanding dengan mass flowrate.

Coriolis meter tersedia dalam beberapa disain yang berbeda, konfigurasi yang populer terdiri dari satu atau dua U-shaped, horseshoe-shaped atau tennis-racket-shaped (umumnya adalah U-shaped) yaitu pipa (tube) untuk aliran dengan inlet pada satu sisi dan outlet pada sisi yang lain dan dihubungkan dengan kotak untuk koneksi ke unit elektronik.



Gambar 3.33. Coriolis Flowmeter

2. Spesifikasi Umum

Spesifikasi umum dari coriolis flowmeter, adalah sebagai berikut :

Fluid Phase:

Score	Phase	Condition
👍	Liquid	Clean
👍		Direct Mass
👍		Dirty
👍		Non-Newtonian
👍		Viscous
👍	Slurry	Abrasive
👎	Gas	Clean
👎		Dirty
👎	Liquid	Corrosive
👎	Slurry	Fibrous

👍: Recommended
 👎: Limited applicability

Line Size: 6 ~ 200 mm (0.25 ~ 8 inch)

Turndown Ratio: 100 : 1

3. Kelebihan dan Kekurangan

Kelebihan

- Akurasi : tinggi.
- Dapat digunakan secara luas pada berbagai kondisi aliran fluida.
- Mampu mengukur aliran fluida panas (molten sulphur, liquid toffee) dan aliran fluida dingin (cryogenic helium, liquid nitrogen).
- Pressure drop : rendah.
- Sesuai untuk bi-directional flow

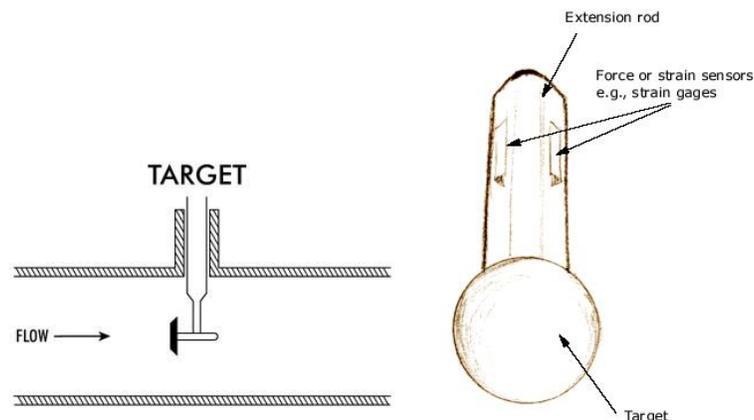
Kekurangan

- Biaya pengadaan awal : tinggi
- Kemungkinan penyumbatan (clogging) terjadi dan sukar dibersihkan
- Ukuran secara keseluruhan besar (dibanding dengan flowmeter lain)
- Ukuran Line size yang tersedia : terbatas.

G. Target Flowmeters

1. Prinsip Operasi

Target flowmeters yang juga dikenal sebagai *drag force flowmeters*, menyisipkan suatu target (*drag element* yang umumnya adalah *flat disc* atau *sphere* dengan suatu tangkai) ke dalam bidang aliran (*flow*). Flowmeter kemudian mengukur gaya tarik (*drag force*) pada target yang disisipkan kemudian mengkonversinya kedalam kecepatan aliran (*flow velocity*).



Gambar 3.34. Prinsip Operasi Target Flowmeters

Kunci utama dari target flowmeter ini adalah pengukuran dari drag force. Drag force (F_d) yang diberikan oleh persamaan incompressible flow, adalah :

$$F_d = \frac{C_d \rho A V^2}{2}$$

Dimana :

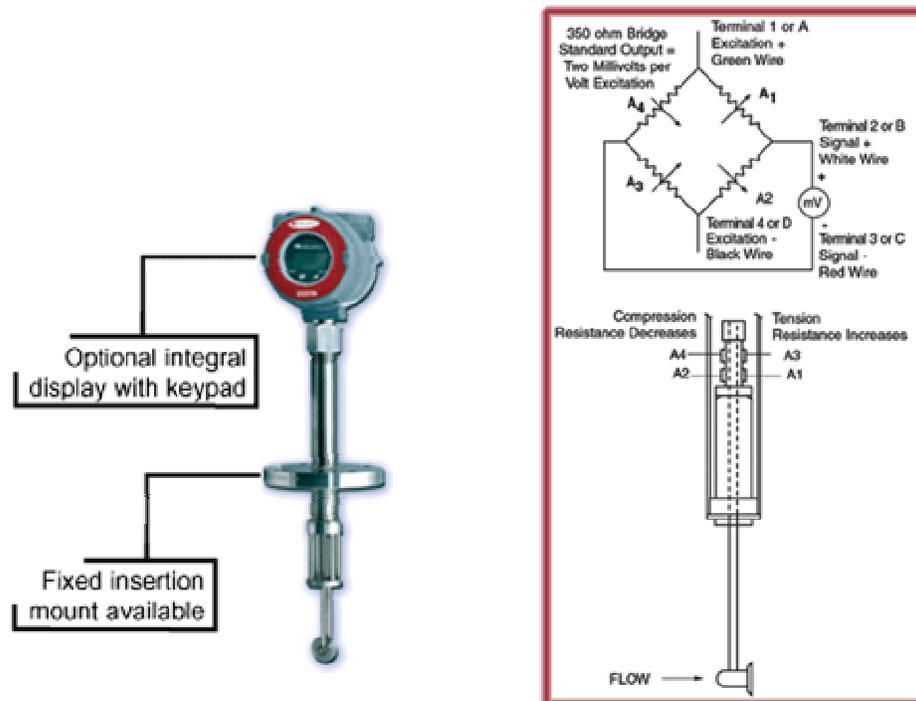
- V = flow velocity
- ρ = density dari fluida
- A = Luas area dari target
- C_d = Drag coefficient

Drag coefficient ditentukan secara eksperimen, didasarkan pada kondisi flow dan bentuk geometry dari drag element.

Untuk flat plate dan sphere, drag coefficientnya adalah :

$$C_d^{\text{Flat Plate}} = 1.28$$

$$C_d^{\text{Sphere}} = 0.07 \sim 0.5$$



Gambar 3.35. Prinsip Operasi Target Flowmeters



2. Spesifikasi Umum

Spesifikasi umum dari target flowmeter, adalah sebagai berikut :

Fluid Phase:

Score	Phase	Condition
	Cryogenic	
	Gas	Clean
		Dirty
	Liquid	Clean
		Dirty
		Viscous
	Steam	Saturated
	Liquid	Corrosive

: Recommended
: Limited applicability

Line Size: Inline models: 15 ~ 150 mm (0.5 ~ 6 inch)
Insertion models: 100 ~ 1500 mm (4 ~ 60 inch)

Turndown Ratio: 15 : 1

3. Kelebihan dan Kekurangan

Kelebihan

- Biaya pengadaannya awal : rendah
- Dapat digunakan pada aliran fluida yang abrasive, terkontaminasi atau korosif.

Kekurangan

- Pressure drop tidak dapat diabaikan sehubungan dengan drag element dan tangkai.

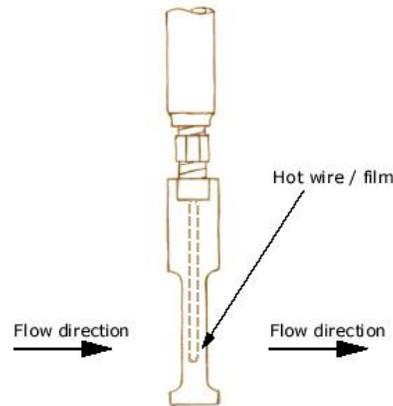
H. Thermal Flowmeters

1. Prinsip Operasi

Thermal mass flowmeter didasarkan pada pengukuran panas yang diserap dari sensor akibat dialiri fluida. Jumlah panas yang diserap menentukan laju aliran massa (*mass flow rate*).

Flowmeter ini mempunyai dua buah sensor, salah satu dari sensor adalah sensor flow terbuat dari *heated wire* atau *film (self heated)*. Bentuk umum sensor ini adalah platinum/tungsten RTD (Resistance Temperature Detector).

Sensor kedua adalah RTD yang digunakan untuk mengukur temperature aliran gas (temperature reference). Keduanya dikenal sebagai sensing element dan dipasang didalam sebuah probe sebagai flowmeter (insertion style) atau flowmeter (in-line style).



Gambar 3.36. Prinsip Operasi Thermal Mass Flowmeter

Ketika aliran gas melewati hot wire (flow sensor) maka molekul gas menyerap atau membawa panas dari permukaan sensor tersebut, sehingga sensor menjadi dingin akibat kehilangan energi. Selanjutnya sensor mengaktifkan rangkaian elektronik untuk mengisi energi yang hilang dengan cara memanaskan flow sensor hingga perbedaan temperature yang tetap diatas reference sensor.

Daya listrik yang diperlukan untuk mempertahankan perbedaan temperatur yang tetap adalah berbanding lurus dengan mass flowrate dan selanjutnya dikeluarkan sebagai output signal yang linear dari flowmeter.



Gambar 3.37. Thermal Mass Flowmeter



2. Spesifikasi Umum

Spesifikasi umum dari thermal flowmeter, adalah sebagai berikut :

Fluid Phase:

Score	Phase	Condition
👍	Gas	Clean
👎	Gas	Dirty

👍: Recommended

👎: Limited applicability

Line Size: Inline models: 6 ~ 100 mm (0.25 ~ 4 inch)
Insertion models: 64 ~ 1500 mm (2.5 ~ 60 inch)

Turndown Ratio: 100 ~ 1000 : 1

3. Kelebihan dan Kekurangan

Kelebihan

- Biaya pengadaannya awal : sedang
- Pressure drop : rendah

Kekurangan

- Biaya maintenance tinggi
- Hanya untuk gas bersih.

I. Ultrasonic Flowmeters

1. Prinsip Operasi

Pengukuran laju aliran (*flow rate*) dengan metoda ini melibatkan elemen pengirim (*transmitter*) dan penerima (*receiver*) untuk frekuensi akustik. Pada elemen pengirim, transducer berfungsi mengubah tegangan listrik frekuensi tinggi menjadi getaran kristal (akustik). Sedangkan pada elemen penerima, transducer mengubah getaran kristal (akustik) menjadi sinyal listrik.

Oleh karena daerah kerja frekuensi dari pengirim dan penerima di atas 20 KHz (misalnya 10 MHz), maka disebut ultrasonic. Secara umum metoda ultrasonic dibedakan atas :

- **Model Transit time** : berdasarkan waktu lintas gelombang ultrasonic dari pengirim (transmitter) ke penerima (receiver).
- **Model Doppler** : berdasarkan frekuensi pelayangan Doppler.

Ultrasonic flowmeter dapat digolongkan ke dalam dua jenis didasarkan pada metoda instalasi, yaitu :

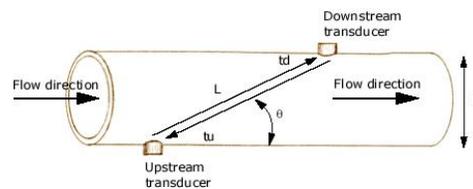
- **Clamped-on** ; instalasinya ditempatkan di luar pipa
- **Inline** ; Instalasinya ditempatkan bersatu dengan pipa menggunakan flanges

2. Transit Time Ultrasonic Flowmeter

a. Prinsip Operasi

Transit Time ultrasonic Flowmeter, terdiri dari satu pasang transducers (masing-masing sebagai transmitter dan receiver), ditempatkan pada dinding pipa (satu set pada upstream dan satu set pada downstream).

Waktu yang digunakan gelombang akustik untuk melintas dari transducer (upstream) ke transducer (downstream) adalah t_d lebih pendek dibanding waktu yang digunakan untuk melintas dari downstream ke upstream t_u .



$$V = \frac{L^2}{8X} \left[\frac{(t_u + t_d)^2 (t_u - t_d)}{t_u^2 t_d^2} \right]$$
$$\approx \frac{L^2 \Delta t}{2X t_u t_d}$$



Gambar 3.38. Transit Time Ultrasonic Flowmeter



b. Spesifikasi Umum

Spesifikasi umum dari transit time ultrasonic flowmeter, adalah :

Fluid Phase:

Score	Phase	Condition
👍	Gas	Clean
👍	Liquid	Clean
👍		Corrosive
👍		Dirty
👎	Gas	Dirty
👎	Liquid	Open Channel
👎		Viscous

👍: Recommended

👎: Limited applicability

Line Size: Inline model: 10 ~ 1200 mm (0.4 ~ 48 inch)
Clamped-on model: 75 mm (3 in) and up

Turndown Ratio: 100: 1

c. Kelebihan dan Kekurangan

Kelebihan

- Tidak ada penghalang di lintasan aliran, sehingga tidak ada pressure drop.
- Tidak ada part bergerak (moving parts), sehingga maintenance cost rendah.
- Model multi-path mempunyai ketelitian lebih tinggi
- Dapat digunakan untuk mengukur flow fluida yang korosif dan slurry.
- Model portable tersedia untuk analisa dan diagnosa di lapangan.

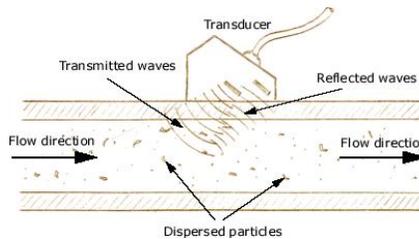
Kekurangan

- Biaya pengadaan awal : tinggi
- Model single path (one-beam) tidak sesuai untuk pengukuran kecepatan aliran (flow velocity) yang bervariasi di atas range Reynolds numbers.

3. Doppler Ultrasonic Flowmeters

a. Prinsip Operasi

Flowmeter ini didasarkan pada efek Doppler yang menghubungkan frekuensi pelayangan gelombang akustik dengan kecepatan aliran.



$$V = \frac{c \Delta f}{2f \cos \theta}$$

Gambar 3.39. Prinsip Kerja Doppler Ultrasonic Flowmeters

b. Spesifikasi Umum

Spesifikasi umum dari ultrasonic flowmeter, adalah sebagai berikut :

Score	Phase	Condition
👍	Gas	Dirty
👍	Liquid	Corrosive
👍		Dirty
👍		Open Channel
👎	Gas	Clean
👎	Liquid	Clean
👎		Viscous

👍: Recommended
 👎: Limited applicability

Line Size: Inline model: 10 ~ 1200 mm (0.4 ~ 48 inch)
 Clamped-on model: 75 mm (3 in) and up

Turndown Ratio: 100 : 1



Gambar 3.40. Doppler Ultrasonic Flowmeters

c. Kelebihan dan Kekurangan

Kelebihan

- Tidak ada penghalang di lintasan aliran, sehingga tidak ada pressure drop.
- Tidak ada part bergerak (moving parts), sehingga maintenance cost rendah.
- Dapat digunakan untuk mengukur flow fluida yang korosif dan slurry.
- Model portable tersedia untuk analisa dan diagnosa di lapangan.

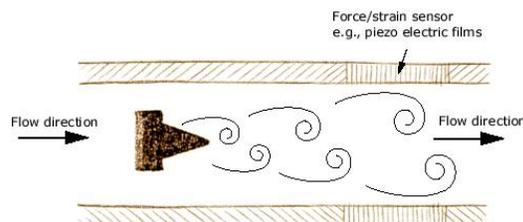
Kekurangan

- Biaya pengadaan awal : tinggi

J. Vortex Flowmeters

1. Prinsip Operasi

Flowmeter ini dikenal juga sebagai *vortex shedding flowmeters* atau *oscillatory flowmeters*, prinsip kerjanya didasarkan pada pengukuran getaran (*vibration*) pada downstream pusaran (*vortex*) yang disebabkan oleh penghalang yang ditempatkan pada aliran fluida. Frekwensi getaran dari vortex dapat dihubungkan dengan laju aliran fluida



Gambar 3.41. Prinsip Kerja Vortex Flowmeters



$$Q = \frac{f_v \pi D^3}{4S} \left(\frac{w}{D} \right) \left(1 - \frac{4}{\pi} K \frac{w}{D} \right)$$

Dimana :

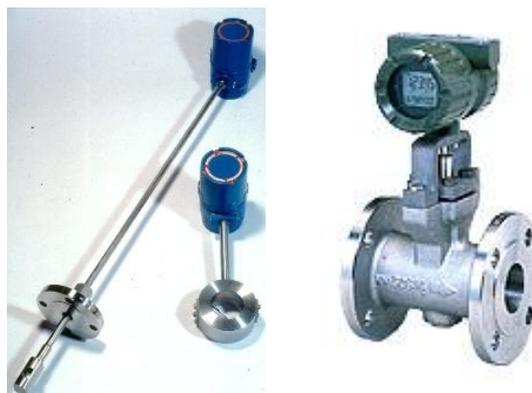
- Q = Volum flowrate
- f_v = frequency of vortex shedding
- D = diameter of the pipe
- S = strouhal number
- K = K factor

K factor pada umumnya diperkenalkan untuk mengganti kerugian untuk profil yang tidak seragam dari pipa.

S strouhal number ditentukan secara eksperimen.

w/D	S
0.1	0.18
0.3	0.26
0.5	0.44

Persamaan di atas mengasumsikan keadaan mantap (*steady state*) dari aliran pada upstream. Gangguan pada upstream akan mempengaruhi frekuensi dari vortex sehingga mengakibatkan kesalahan pengukuran.



Gambar 3.42. Vortex Flowmeters



2. Spesifikasi Umum

Spesifikasi umum dari vortex flowmeter, adalah sebagai berikut :

Fluid Phase:

Score	Phase	Condition
	Gas	Clean
		Dirty
	Liquid	Clean
	Steam	Saturated
		Superheated
	Liquid	Corrosive
		Dirty

: Recommended

: Limited applicability

Line Size: Inline model: 10 ~ 1200 mm (0.4 ~ 48 inch)
Insertion model: 75 mm (3 in) and up

Turndown Ratio: 10: 1

3. Kelebihan dan Kekurangan

Kelebihan

- Biaya pengadaan awal : rendah ~ sedang.
- Tidak dibutuhkan maintenance bila digunakan pada aliran fluida yang bersih.

Kekurangan

- Pressure drop : rendah ~ sedang



3.3. Pengukuran Level Fluida (Level Measurements)

3.3.1. Umum

Pemilihan metoda pengukuran level yang sesuai aplikasi, biasanya lebih sulit dibanding dengan keempat proses variabel utama kecuali flow. Seperti pada pengukuran flow, kondisi dari media yang diukur kadang-kadang mempunyai banyak efek yang kurang baik pada alat ukur, sehingga data kondisi operasi harus diketahui lebih banyak didalam pemilihan alat ukur level.

Kondisi operasi yang harus diketahui adalah :

1. Level range
2. Fluida characteristic
 - Temperature
 - Pressure
 - Specific gravity
 - Apakah fluida bersih atau kotor, mengandung vapors atau solids, dll.
3. Efek korosif.
4. Apakah fluida mempunyai kecenderungan efek "coat" atau menempel pada dinding vessel atau measuring device.
5. Apakah fluida tersebut turbulent disekitar area pengukuran.

Secara normal tidak ada kesulitan berarti didalam mengukur level fluida bersih dan nonviscous, namun untuk material "slurry" atau material dengan viscous yang berat dan solid, bagaimanapun banyak menimbulkan masalah.

3.3.2. Pengelompokan (Categorization)

Beberapa jenis methode pengukuran level atau tinggi permukaan untuk fluida yang sering digunakan di industri proses, dapat dikelompokkan sebagai berikut :

1. Displacement
2. Differential pressure
3. Capacitance
4. Ultrasonic
5. Radar
6. Radiation

Keterangan

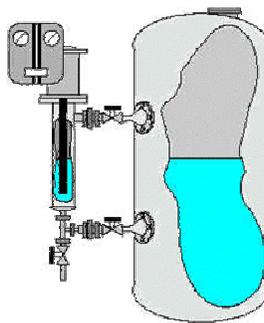
-  = Recommended
-  = Limited applicability
-  = Not Recommended

3.3.3. Alat Ukur Level (Level Measurement Devices)

A. Displacement Type

1. Prinsip Operasi

Prinsip kerja alat ini yaitu jika sebuah pelampung diapungkan pada permukaan fluida, maka pelampung akan naik dan turun mengikuti gerakan dari permukaan fluida yang bersangkutan. Selanjutnya dengan suatu mekanisme, pergerakan pelampung ini dapat ditranslasikan kedalam alat ukur displacer level berdasarkan prinsip Archimedes.



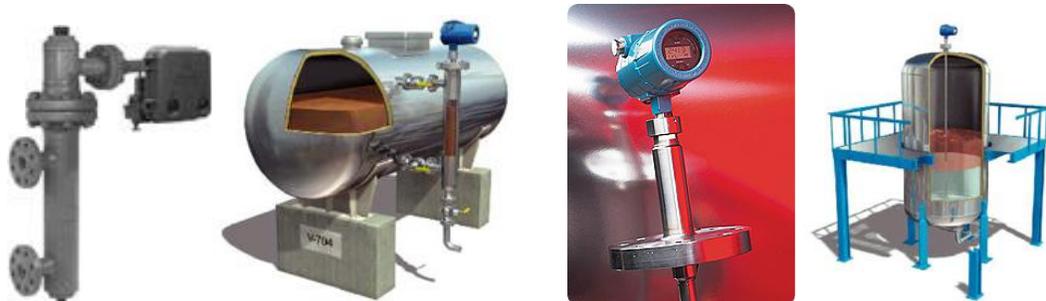
CATEGORIES	SCORE
LIQUID	Recommended
GRANUARS	Not Recommended
SLURRIES	Limited Applicability
INTERFACE	Limited Applicability

Gambar 3.43. Displacement Level Measurement

Displacement atau *buoyancy method* pada gambar di atas, adalah metode pengukuran tinggi permukaan fluida yang paling banyak digunakan sejak beberapa tahun yang lalu. Metode ini masih tetap populer untuk fluida yang bersih, namun banyak proses yang mengandung "slurry" yang cenderung mengakibatkan "coat" pada alat ukur jenis tersebut. Sehingga diperlukan metode lain yang lebih dapat diterima.

2. Klasifikasi Displacement Device

Peralatan Displacement Device dapat diklasifikasikan dalam dua kelompok yaitu *external installation* dan *internal installation*.



(a) Pemasangan External

(b) Pemasangan Internal

Gambar 3.44. Level Device - Displacement type

3. Kelebihan dan Kekurangan

Kelebihan dan kekurangan dari metoda displacement adalah :

Kelebihan

- Akurasinya tinggi
- Handal pada liquid yang bersih.
- Metoda terbukti (proven)
- Dapat dipasang secara internal atau secara eksternal.
- Pemasangan secara external pada unit dapat di blok dengan valve untuk maintenance.
- Dapat digunakan untuk mengukur liquid interface.

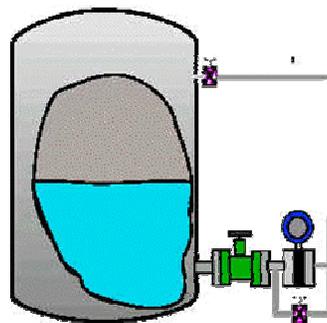
Kekurangan

- Range terbatas (level > 48 inches sukar untuk ditangani).
- Biaya meningkat untuk unit eksternal sehubungan dengan pressure rating meningkat.
- External units kemungkinan memerlukan pemanas (heating) untuk menghindari pembekuan (freezing).
- External units kemungkinan menghasilkan kesalahan disebabkan perbedaan temperature antara fluida didalam vessel dengan fluida di dalam level chamber.

B. Differential Pressure Type

1. Prinsip Operasi

Pengukuran level jenis *differential pressure (DP)* didasarkan pada prinsip "*hydrostatic head*". Prinsip ini mengatakan bahwa pada setiap titik di dalam fluida yang diam (*static*), gaya yang bekerja padanya adalah sama untuk semua arah dan tidak tergantung pada volume fluida maupun bentuk ruang atau tempat dimana fluida berada, tetapi hanya bergantung pada tinggi kolom fluida di atas titik yang bersangkutan. Oleh karena itu hydrostatic head sering dinyatakan dalam satuan tekanan.



CATEGORIES	SCORE
LIQUID	Recommended
GRANUARS	Not Recommended
SLURRIES	Limited Applicability
INTERFACE	Limited Applicability

Gambar 3.45. Differential Pressure Level Measurement

Hydrostatic head dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan :

$$P = \rho \cdot g \cdot h$$

Dimana :

- P = tekanan " hydrostatic head "
- ρ = fluid density
- g = gravity acceleration constant (9.81 m/s² or 32.2 ft/s²)
- h = level fluid

Aplikasi pengukuran level dengan menggunakan metoda perbedaan tekanan atau tekanan hidrostatik telah mengalami kemajuan yang signifikan beberapa tahun lalu. Peralatan D/P ini memungkinkan untuk mengukur level dengan range yang lebar pada services yang bersih, korosif, slurry dan high viscous.

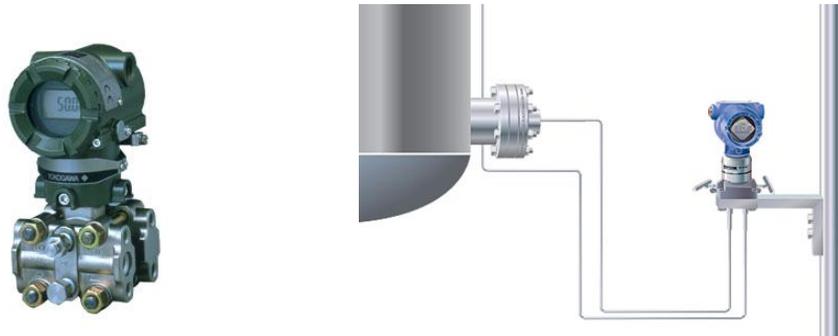
Hampir semua jenis peralatan D/P dapat digunakan untuk mengukur level jika peralatan tersebut tersedia dalam range yang diperlukan untuk level yang dimaksud. Pada umumnya range D/P untuk level adalah sekitar (10 ~ 150) inches H₂O.

2. Klasifikasi Differential Pressure Device

Peralatan D/P dapat diklasifikasikan dalam dua kelompok yaitu *sealed* dan *nonsealed* system.

a. Nonsealed system

Peralatan *differential pressure (D/P cell transmitter)* seperti pada gambar di bawah biasanya digunakan untuk mengukur flow, namun dapat juga digunakan untuk mengukur level. Peralatan D/P ini dalam aplikasinya digunakan secara kontak langsung dengan fluida dan dapat dibersihkan dengan gas atau liquid yang sesuai.



(a) D/P cell Transmitter

(b) D/P Cell untuk aplikasi pengukuran Level

Gambar 3.46. DP cell Nonsealed System

Kelebihan

- Akurasi baik
- Dapat digunakan pada range level yang lebar.
- Tersedia didalam banyak material konstruksi.
- Dapat dibersihkan (dipurge) untuk penggunaan service yang korosif dan slurry.
- Biaya pengadaan awal : sedang (moderat).
- Dapat diisolasi dan zero ditempat.

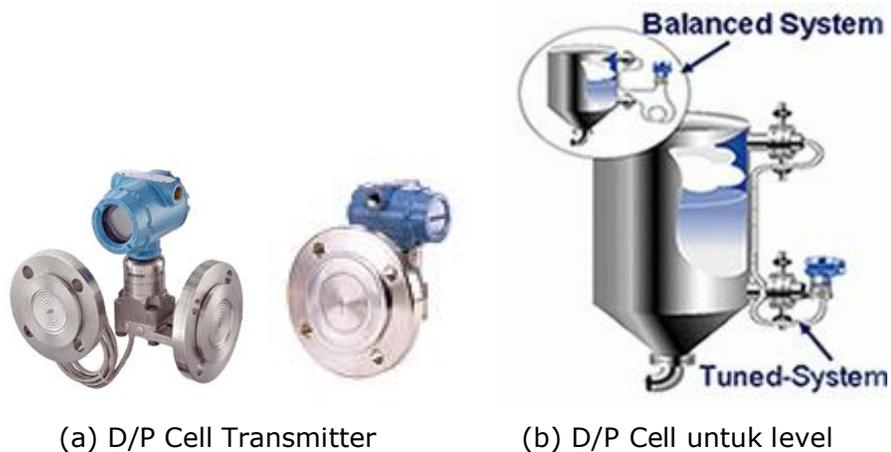
Kekurangan

- Kesalahan (error) disebabkan oleh density yang bervariasi.
- Lead line / impuls line (low pressure) tidak dibutuhkan pada aplikasi atmospheric.
- Pemanasan (heating) pada lead line / impuls line kadang-kadang dibutuhkan.
- Problem operasi dan maintenance sering terjadi disebabkan kegagalan purged lines.
- Perbersihan material sering dilakukan pada servis proses yang sulit.

b. Sealed system

Untuk memenuhi persyaratan aplikasi pengukuran level yang sulit misalnya pada material seperti slurry dan high viscous, sealed system sering memberikan solusi yang sesuai untuk pengukuran level tersebut.

Gambar di bawah memperlihatkan D/P cell jenis sealed system, di mana measuring element terisolasi dari cairan proses (*process liquid*).



(a) D/P Cell Transmitter

(b) D/P Cell untuk level

Gambar 3.47. DP cell Sealed System



Kelebihan

- Purge tidak diperlukan
- Baik untuk slurry dan material yang korosif.
- Range pengukuran : lebar.
- Akurasi : sedang ~ tinggi
- Dapat digunakan untuk vessel yang terbuka atau tertutup.
- Baik untuk temperature relative tinggi.
- Pemasangan simple dan mudah.

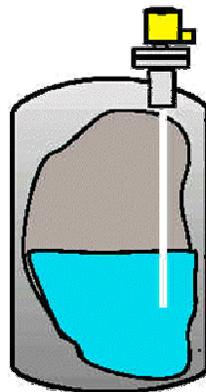
Kekurangan

- Unit tidak dapat dilepas untuk tujuan maintenance tanpa men-shutdown peralatan (equipment).
- Density yang bervariasi menyebabkan error.
- Letak pemasangan harus dipertimbangkan sehubungan dengan pengaruh pada kalibrasi.
- Perubahan temperature ambient menyebabkan error pada jenis "capillary filled system".

C. Capacitance Type

1. Prinsip Operasi

Sebuah kapasitor terbentuk ketika elektroda sensor level dipasang didalam sebuah vessel. Tangkai metal dari elektroda bertindak sebagai satu plate dari kapasitor dan dinding tangki bertindak sebagai plate yang lain (untuk non metallic vessel dibutuhkan reference elektroda sebagai plate yang lain dari kapasitor).



CATEGORIES	SCORE
LIQUID	Recommended
GRANUARS	Limited Applicability
SLURRIES	Not Recommended
INTERFACE	Limited Applicability

Gambar 3.48. Capacitance Level Measurement

Ketika level fluida naik, udara atau gas yang semula melingkupi elektroda akan digantikan oleh material (fluida) yang mempunyai konstanta dielektik (*dielectric constant*) yang berbeda, sehingga suatu perubahan didalam nilai kapasitor terjadi sebab dielektrikum antara plat telah berubah. *RF (Radio Frequency) capacitance instrument* mendeteksi perubahan tersebut dan mengkonversinya kedalam suatu sinyal keluaran secara proporsional.

Hubungan kapasitansi digambarkan dengan persamaan sebagai berikut :

$$C = 0.225 K (A / D)$$

Dimana :

- C = Capacitance (picoFarads)
- K = Dielectric constant dari material
- A = Area of plates (square inches)
- D = Distance between the plates (inches)

2. Klasifikasi Differential Pressure Device

Capacitance Level measurements diklasifikasikan ke dalam dua kategori yaitu continuous measurement dan point measurement.

1. Continuous Measurement



Gambar 3.49. Continuous measurement

Keuntungan

- Dapat digunakan untuk beberapa aplikasi di mana jenis yang lain tidaklah mungkin digunakan.
- Biaya pemasangan awal : sedang
- Akurasi ; sedang
- Dapat digunakan pada aplikasi high temperature dan high pressure.
- Dapat digunakan untuk services polymer dan slurry.

Kekurangan

- Pada banyak kejadian, membutuhkan kalibrasi khusus.
- Terpengaruh oleh density bervariasi dari material yang diukur.
- Pembacaan error ketika terjadi lapisan (coating) pada probe.

2. Point Measurement

Capacitance probe untuk point measurement pada saat ini telah menjadi umum penggunaannya. Alat ukur ini sangat baik untuk mengukur level media powder, solid dan slurry yang sulit diukur.



Gambar 3.50. Point measurement

Keuntungan

- Biaya pengadaan awal : rendah
- Mudah untuk dipasang
- Tidak ada part yang bergerak.
- Bermanfaat untuk aplikasi material berisi powder, butiran, solid, slurry dan material corosif (dimana banyak level device tidak bekerja dengan baik).

Kekurangan

- Akurasi dipengaruhi oleh karakteristik material.
- Coating pada probe menyusahkan pada beberapa design.

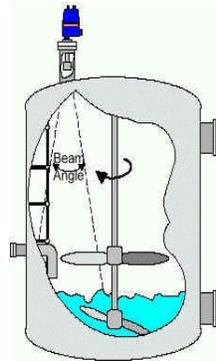
D. Ultrasonic Types

1. Prinsip Operasi

Ultrasonic transmitter bekerja dengan prinsip pemancaran gelombang suara dari *peizo electric transducer* kedalam vessel yang berisi material proses. Alat ini mengukur lama waktu yang dibutuhkan gelombang suara yang dipantulkan kembali ke transducer. Pengukuran yang baik tergantung pada pantulan gelombang suara dari material proses secara garis lurus yang kembali ke transducer.

Ultrasonic level detectors pada gambar di bawah digunakan terutama untuk point measurement. Alat ini sudah digunakan sejak tahun 1960, hampir sama seperti capacitance probe, alat ini juga sering digunakan untuk mengukur

level pada service dimana sering timbul permasalahan bilamana menggunakan metoda pengukuran tradisional.



CATEGORIES	SCORE
LIQUID	Recommended
GRANUARS	Limited Applicability
SLURRIES	Recommended
INTERFACE	Limited Applicability

Gambar 3.51. Prinsip Kerja Ultrasonic Level Measurement

2. Kelebihan dan Kekurangan



Gambar 3.52. Ultrasonic Level Measurement Devices

Keuntungan

- Tidak ada part yang bergerak (No moving parts), membutuhkan sedikit maintenance.
- Teknologi Non-contact
- Mudah dipasang dan dikalibrasi
- Akurasi baik bilamana aplikasi sesuai.
- Dapat diaplikasikan pada pengukuran level material seperti powder, fluida yang mengandung padatan serta slurry.

Kekurangan

- Tidak dapat beroperasi pada vakum dan tekanan tinggi.
- Range Temperature dan Pressure terbatas.
- Harga relative tinggi.
- Posisi sangat sensitive disbanding teknologi lain.

E. Radar Type

1. Prinsip Operasi

Teknologi radar untuk aplikasi pengukuran level yang ada dipasaran adalah *Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW)* atau *Pulse Wave Time of Flight*.

Sistem Pulsed Wave bekerja dengan memancarkan suatu gelombang mikro (microwave) ke arah material proses, gelombang ini dipantulkan oleh permukaan dari material proses dan dideteksi oleh sensor yang sama yang bertindak sebagai penerima (receiver). Level ditentukan dari waktu tempuh dari sinyal gelombang mikro dari transmitter ke receiver.

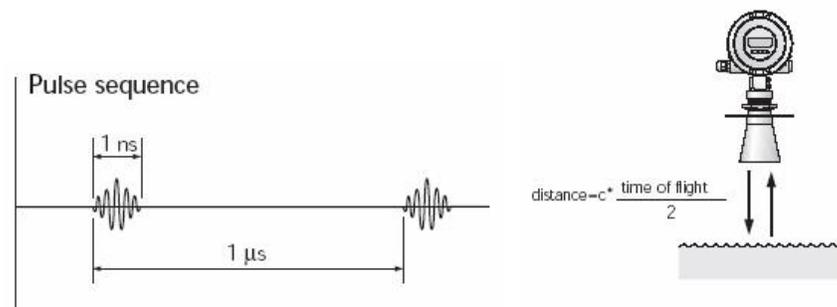
Sistem FMCW bekerja dengan memancarkan suatu signal frekuensi secara terus menerus dan jarak ditentukan dari perbedaan frekwensi antara sinyal transmitter dan receiver pada setiap titik pada waktunya.



CATEGORIES	SCORE
LIQUID	Recommended
GRANULARS	Limited Applicability
SLURRIES	Recommended
INTERFACE	Not Recommended

Gambar 3.53. Prinsip Kerja Radar Level Measurement

Secara umum prinsip kerja dari radar level adalah sebagai berikut ; Level dari cairan diukur dengan radar pulsa yang pendek yang dipancarkan dari antena di bagian puncak tanki ke arah cairan. Setelah radar pulsa dipantulkan oleh permukaan cairan, maka antena menerima pulsa tersebut. Jarak dari meter gauge ke permukaan cairan (d) adalah sebanding dengan waktu tempuh pulsa gelombang micro (t). Frekuensi yang digunakan radar adalah 5.8 GHZ (6.3 GHZ di AS).



$$Distance = C . (time\ of\ flight / 2)$$

2. Kelebihan dan Kekurangan



Gambar 3.54. Radar Level Measurement

Kelebihan

- Teknologi : Non-contact
- Akurasi : tinggi

Kekurangan

- Biaya pengadaan awal : tinggi
- Pressure rating : terbatas
- Tidak dapat mengukur interface

F. Radiation Type

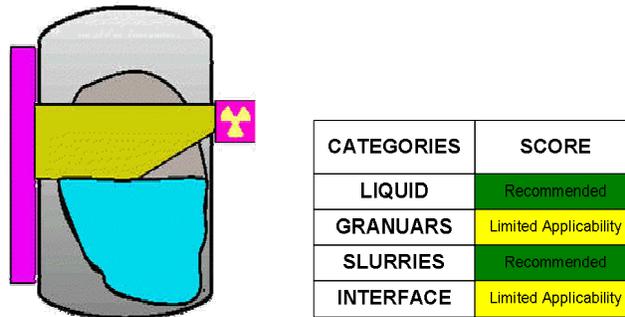
1. Prinsip Operasi

Seperti beberapa metoda pengukuran level lainnya, jenis radioactive (nucleonic) digunakan juga sebagai continuous measurement dan point measurement. Pada continuous measurement, radiation level menyediakan persentase dari penurunan transmisi sesuai level, dan untuk point measurement, radiation level menyediakan suatu fungsi switch on/off.

Radio isotop yang digunakan pada pengukuran level akan memancarkan energi pada suatu tingkat rate yang konstan secara acak. Radiasi gamma adalah sumber yang secara umum digunakan untuk nucleonic level gauging. Panjang gelombang pendek dan energi yang tinggi dari radiasi gamma menembus dinding vessel dan media proses. Sebuah detektor di sisi yang lain dari vessel mengukur kekuatan bidang radiasi dan menyimpulkan level di dalam vessel.

Secara umum, radioactive level adalah metoda pengukuran level yang mahal dan perlu dipertimbangkan secara serius bilamana akan diimplementasikan. Bukan hanya hardware yang mahal, tetapi calibration dan testing juga

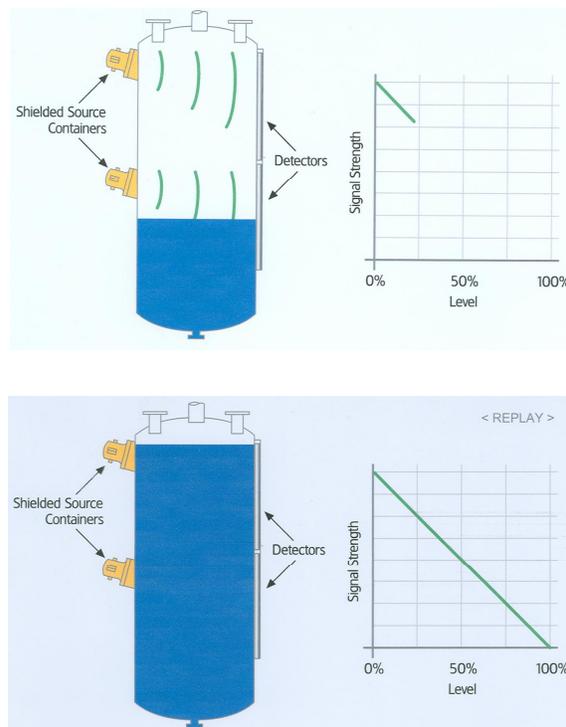
membutuhkan waktu yang lama serta biaya operasi yang tinggi. Oleh karena alat ini sering digunakan sebagai metoda terakhir yang dipilih bila semua metode gagal digunakan pada suatu aplikasi, maka biaya keseluruhan tetap dipertimbangkan secara ekonomis dalam pemilihannya.



Gambar 3.55. Radioactive (Nucleonic) Level Measurement

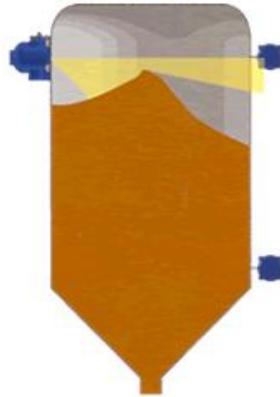
2. Klasifikasi Radiactive Level Device

a. Continuous Systems



Gambar 3.56. Nucleonic Continuous Level Measurement

b. Point Measurement



Gambar 3.57. Nucleonic Point Level Measurement

3. Kelebihan dan Kekurangan

Kelebihan

- Tidak ada part yang bergerak (No moving parts), membutuhkan sedikit maintenance.
- Instalasi eksternal sehingga mudah di-retrofit atau instalasi baru.
- Kehandalan (reliability) tinggi.

Kekurangan

- Biaya pengadaan awal : tinggi
- Memerlukan perijinan oleh agen pengatur.
- Berbahaya dan memerlukan penanganan secara khusus.



3.4. Pengukuran Pressure (Pressure Measurements)

3.4.1. Umum

Tekanan terjadi karena adanya gaya yang bekerja terhadap suatu bidang luasan. Karena itu tekanan dinyatakan sebagai *Gaya* yang bekerja pada suatu *Satuan Luas*. Pada bagian ini akan ditinjau beberapa prinsip pengukuran tekanan yang biasa digunakan di industri proses.

Alat ukur tekanan disebut sebagai *Manometer*. Berbagai macam nama dan tipe manometer yang terdapat di industri proses, bergantung pada prinsip kerja, jenis fluida yang diukur serta kebutuhan penggunaannya. Pada umumnya tekanan fluida yang diukur di industri proses adalah cairan dan gas.

Sesuai dengan definisi dari tekanan di atas, terdapat 4 terminologi penting yang biasa digunakan tentang ukuran atau pengukuran tekanan, yaitu :

a. Absolute Pressure (tekanan absolut)

Gaya yang bekerja pada satuan luas, tekanan ini dinyatakan dan diukur terhadap tekanan NOL.

b. Gauge Pressure (tekanan relatif)

Tekanan yang dinyatakan dan diukur relatif terhadap tekanan atmosfer. Jadi tekanan relatif adalah selisih antara tekanan absolut dengan tekanan atmosfer (1 atmosfer = 760 mmHg = 14.7 psig)

c. Vacum Pressure (tekanan hampa)

Tekanan yang lebih rendah dari tekanan atmosfer

d. Differential Pressure (tekanan differential)

Tekanan yang diukur terhadap tekanan yang lain.

3.4.2. Pengelompokan dan Pemilihan Alat Ukur

Beberapa jenis pengukuran tekanan yang sering digunakan di dalam industri proses dapat dikelompokkan sebagai berikut :

- a. Manometer kolom cairan (U tube)
- b. Bourdon Tube
- c. Diaphragm Pressure Gage
- d. Belows
- e. McLeod Gages

Pemilihan alat ukur pressure (*pressure device*) tidaklah sesulit memilih alat ukur flow dan level. Didalam pengukuran flow dan level, karakteristik dari fluida proses sangat menentukan dalam pemilihan metoda operasi alat ukur tertentu.

Dalam pengukuran pressure, penekanan lebih sedikit pada karakteristik fluida, dan lebih banyak pada pertimbangan akurasi, range pengukuran dan pemilihan material.

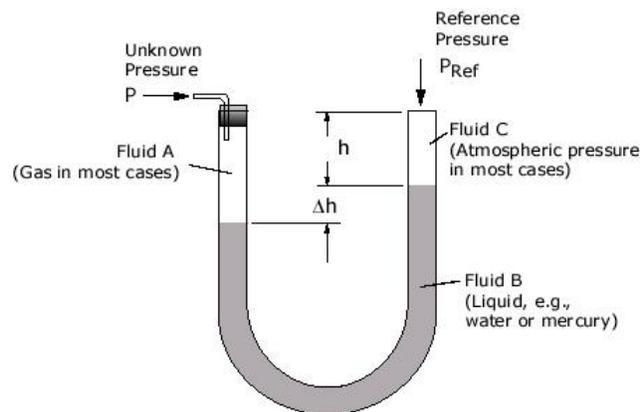
3.4.3. Alat Ukur Tekanan

A. U tube

1. Prinsip Operasi

Tabung U (*U Tube*) adalah contoh sederhana instrument pengukuran tekanan yang menggunakan kolom zat cair. Alat ukur tekana ini terdiri dari air atau air raksa didalam U-Shaped, dan umumnya digunakan untuk mengukur tekanan gas.

Salah satu ujung dari tabung U dihubungkan ke bidang tekanan yang tidak diketahui dan ujung yang lain dihubungkan dengan sumber tekanan acuan (umumnya tekanan atmosfer), seperti pada gambar di bawah ini.



Gambar 3.58. Manometer tabung U dengan kolom zat cair

Dengan membandingkan level dari cairan pada kedua sisi dari tabung U, tekanan yang tidak diketahui dapat diperoleh dari ilmu keseimbangan cairan (fluid static).

$$p + \rho_A g (h + \Delta h) = \rho_B g \Delta h + \rho_C g h + p_{Ref}$$

$$\Rightarrow p = p_{Ref} + (\rho_B - \rho_A) g \Delta h + (\rho_C - \rho_A) g h$$

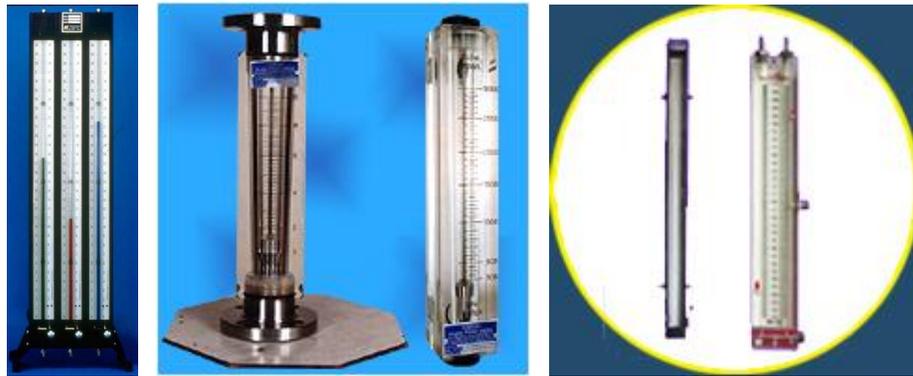
Jika cairan C adalah atmosfer, cairan B adalah cairan di dalam tabung U (air atau air raksa), dan cairan A adalah suatu gas, kemudian diasumsikan bahwa $\rho_B \gg \rho_A, \rho_C$. maka tekanan gage dari gas dapat didekati dengan,

$$p \approx p_{Ref} + \rho_B g \Delta h$$

$$\Rightarrow p_{gage} = p - p_{Ref} = \rho_B g \Delta h$$

2. Spesifikasi Umum

Tabung U adalah manometer standard yang digunakan untuk pengukuran tekanan gauge, tekanan ruang hampa, perbedaan tekanan, baik di dalam industri maupun di dalam laboratorium dimana ketelitian tertentu diperlukan, Alat ukur ini tersedia dalam jenis pemasangan *wall mounted* dan *stand mounted* dengan range pengukuran : 0 - 3000 mm WC/HG.



Gambar 3.59. Manometer U tube

3. Kelebihan dan Kekurangan

Kelebihan

- Biaya pengadaan awal : rendah
- Sederhana dan handal
- Accuracy dan sensitivity : tinggi.
- Sesuai untuk aplikasi low pressure dan low differential pressure.

Kekurangan

- Dynamic response rate : rendah
- Tidak bisa digunakan di dalam lingkungan tanpa bobot.
- Tidak ada proteksi over range.
- Cairan dalam tabung U harus tidak saling bercampur dengan cairan yang diukur (gas atau cairan).
- Dapat terjadi kontaminasi antara air raksa dengan uap air, terutama pada pengukuran tekanan rendah.

B. Bourdon Tube

1. Prinsip Operasi

Bourdon Tube adalah alat ukur tekanan nonliquid. Alat ukur ini secara luas digunakan didalam industri proses untuk mengukur tekanan statis pada beberapa aplikasi. Bentuk dari bourdon tube terdiri dari element (C-type, helical dan spiral) dan dihubungkan secara mekanikal dengan jarum indicator.

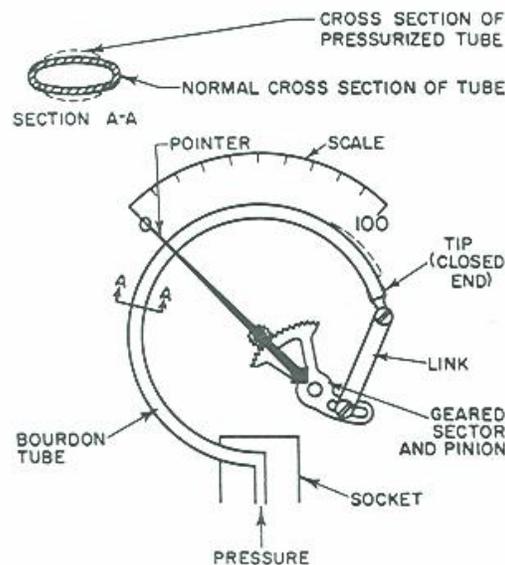
Prinsip operasinya yaitu tekanan dipandu ke dalam tabung, perbedaan tekanan di dalam dan di luar tabung bourdon akan menyebabkan perubahan bentuk penampangnya. Perubahan bentuk penampang akan diikuti perubahan bentuk arah panjang tabung, dimana perubahan panjang tabung akan dikonversikan menjadi gerakan jarum penunjuk pada skala.

Analisa teoritis tentang perubahan bentuk tabung bourdon sebagai fungsi perbedaan tekanan di luar dan di dalam tabung bourdon jarang dilakukan. Perubahan bentuk tabung bourdon diperoleh dari data eksperimental.

Ada tiga tipe tabung bourdon, yaitu : C-type, Spiral dan Helical. Perbedaan masing-masing tipe terletak pada harga tekanan yang ingin diukur.

- **C-type Bourdon Tube**

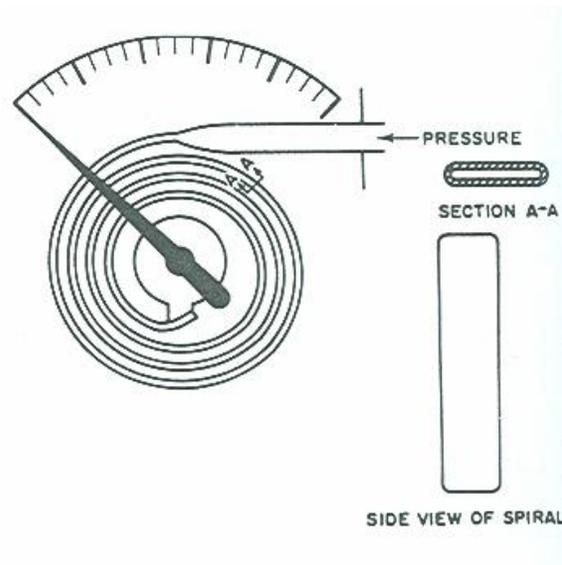
Digunakan untuk range 15 ~ 100.000 psig dengan range akurasi ($\pm 0.1 \sim \pm 5$) % span.



Gambar 3.60. Bourdon Tube (C-type)

- **Spiral Bourdon Tube**

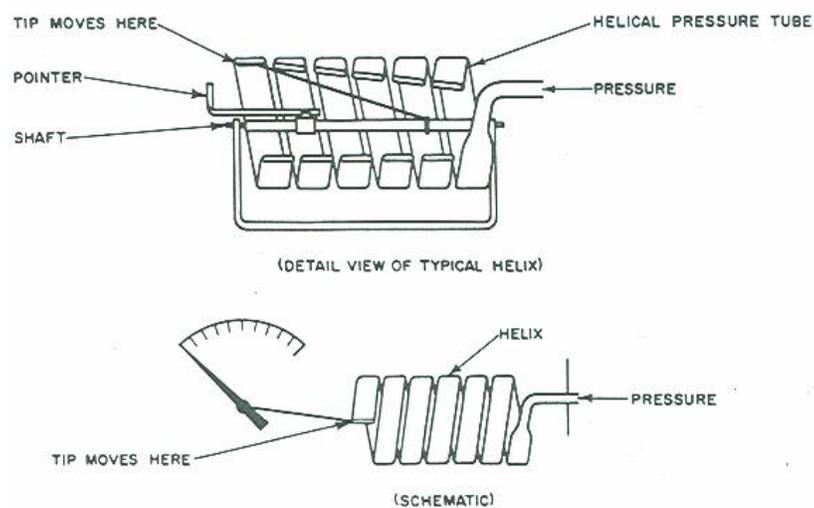
Digunakan secara umum pada range tekanan menengah (medium pressure), tetapi untuk tugas berat juga tersedia dalam range hingga 100.000 psig. Range akurasiya sekitar $\pm 0.5\%$ dari span.



Gambar 3.61. Bourdon Tube (Spiral)

- **Helical Bourdon Tube**

Digunakan pada range dari 100 ~ 80.000 psig dengan akurasi sekitar $\pm \frac{1}{2} \sim \pm 1\%$ dari span.

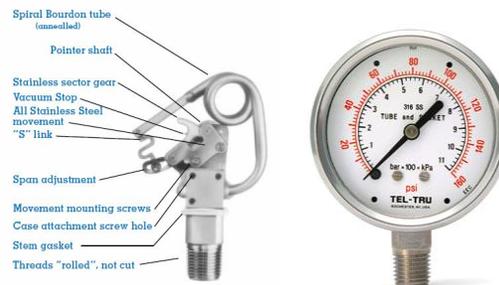


Gambar 3.62. Bourdon Tube (Helical)

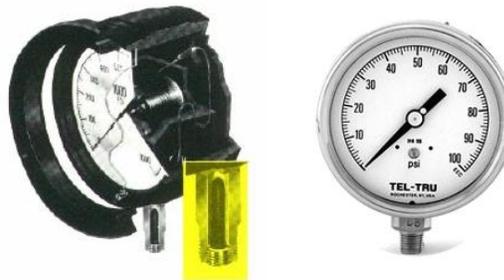
2. Spesifikasi Umum



(a) Bourdon Tube C-Type



(b) Bourdon Tube Tipe Spiral



(b) Bourdon Tube Tipe Helical

Gambar 3.63. Bourdon Tube (C-Type, Spiral dan Helical)

3. Kelebihan dan Kekurangan

Kelebihan

- Biaya pengadaan awal : rendah
- Konstruksi sederhana
- Dapat dikalibrasi dengan mudah (menggunakan mercury barometer).
- Tersedia range yang bervariasi, termasuk range yang sangat tinggi.

Kekurangan

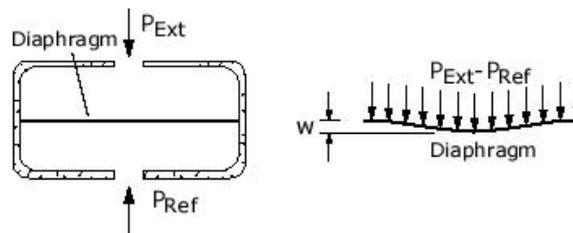
- Peka terhadap guncangan dan getaran
- Mempunyai sifat histerisis
- Akurasi : sedang (tidak cukup baik untuk beberapa aplikasi).

C. Diaphragm Pressure Gage

1. Prinsip Operasi

Diaphragm Pressure Gage menggunakan prinsip perubahan bentuk yang elastis (*elastic deformation*) dari suatu diaphragm (membrane) untuk mengukur perbedaan suatu tekanan yang tidak diketahui dengan suatu tekanan acuan.

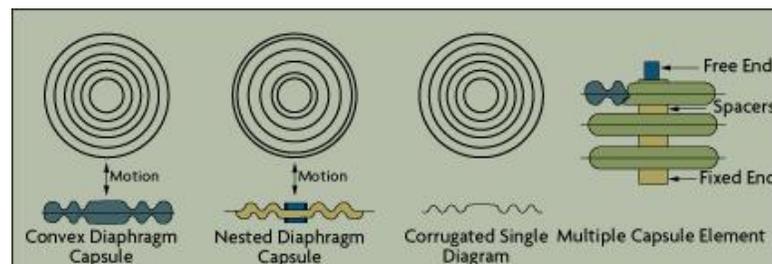
Bentuk dari diaphragm pressure gage terdiri dari kapsul (*capsule*) yang dibagi oleh suatu sekat rongga (diaphragm), seperti ditunjukkan pada gambar di bawah. Satu sisi diaphragm terbuka bagi tekanan target (eksternal) P_{Ext} , dan sisi yang lain dihubungkan dengan tekanan diketahui (reference pressure), P_{Ref} . Beda tekanan, $P_{Ext} - P_{Ref}$, secara mekanik membelokkan diaphragm.



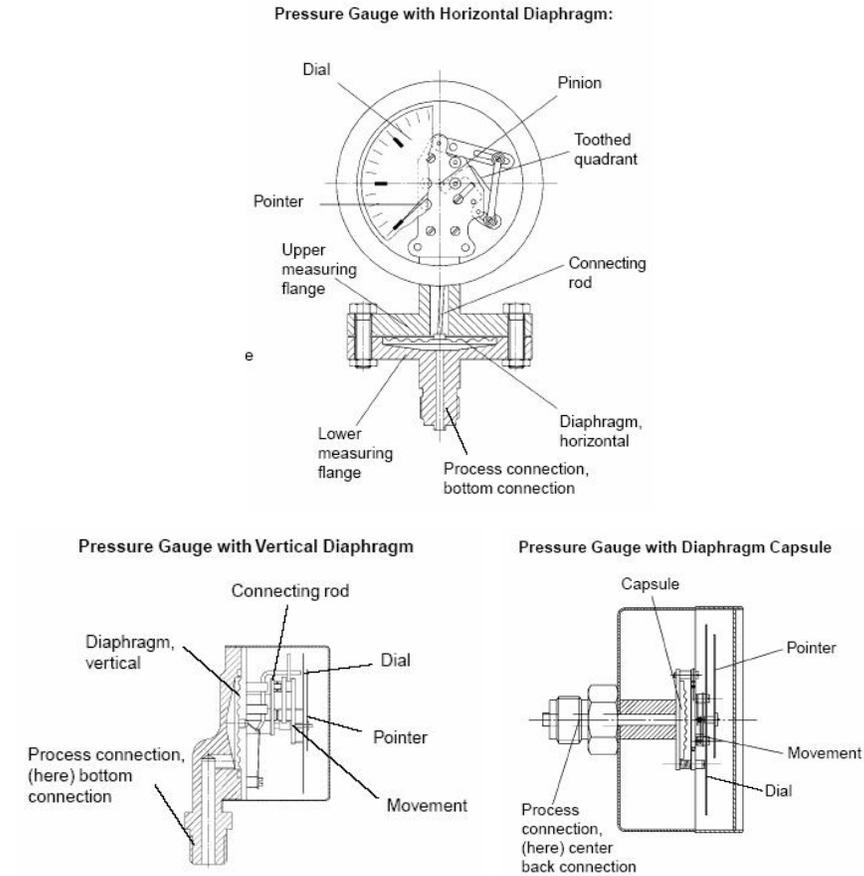
Gambar 3.64. Prinsip operasi Diaphragm Pressure Gage

2. Spesifikasi Umum

Range normal untuk diaphragm elemen mulai dari vacuum hingga 200 psig, dengan akurasi ($\pm 1/2 \sim \pm 1 1/4$) % full span. Gambar berikut memperlihatkan berbagai bentuk disain dari diaphragm yaitu *single capsul* dan *multiple capsul*.



Gambar 3.65. Bentuk disain diaphragm (single capsul dan multiple capsul)



Gambar 3.66. Bentuk Desai Diaphragm Pressure Gage

3. Kelebihan dan Kekurangan

Kelebihan

- Biaya pengadaan awal : sedang
- Karakteristik "overrange" : tinggi
- Linearitas : baik
- Akurasi : baik
- Dapat digunakan untuk pengukuran tekanan asolut, tekanan relatif (gage) maupun tekanan differential.
- Tersedia dalam berbagai macam bahan (tahan terhadap korosi)

Kekurangan

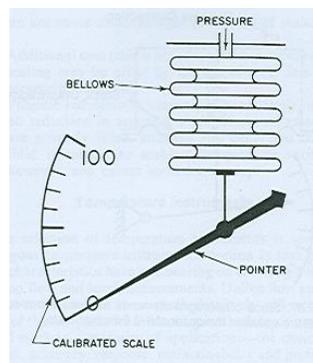
- Sangat peka terhadap getaran dan kejutan
- Jika rusak sulit diperbaiki.

D. Bellows Elements

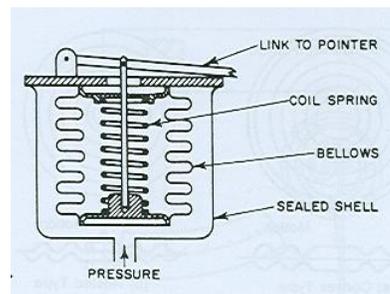
1. Prinsip Operasi

Pengukuran tekanan dengan bellows sangat populer digunakan di dalam industri proses, oleh karena mudah ditangani. Element bellows merupakan elemen elastis yang fleksibel pada arah aksial. Biasanya dibuat dari bahan kuningan, fosfor-perunggu, berrilium-tembaga, monel, stainless steel, inconel dan bahan metal lainnya. Dengan element ini dapat diperoleh hubungan yang linear antara tekanan dan simpangan (perubahan volume).

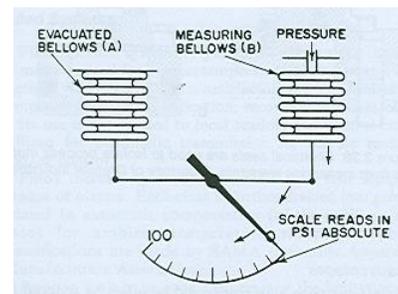
Gambar di bawah ini menunjukkan prinsip pemakaian bellows untuk pengukuran tekanan absolute, tekanan relative (gage) dan tekanan diferensial.



(a) Absolute Pressure



(b) Relative Pressure (Gauge)



(c) Differential Pressure

Gambar 3.67. Prinsip pengukuran tekanan (Bellows Elements)

2. Spesifikasi Umum

Sebagian besar bellows element digunakan untuk pengukuran tekanan rendah (*absolute* atau *relative*) dan tekanan diferensial, beroperasi untuk tekanan vacuum sampai tekanan 0 – 400 psig. Kebanyakan aplikasi dalam range inch H₂O hingga 30 atau 40 psig, namun unit tersedia dalam range 0 – 2.000 psig.

Penggunaan yang terbesar untuk unit bellows adalah sebagai elemen penerima untuk pneumatic recorders, indicators dan controllers. Bellows juga secara luas digunakan sebagai unit diferensial pressure untuk pengukuran aliran (flow) serta recorder dan controller pneumatic yang dipasang di lapangan. Ketelitian bellows element adalah sekitar $\pm 1/2 \%$.



Gambar 3.68. Pressure Differential indicator (Bellows Element)

3. Kelebihan dan Kekurangan

Kelebihan

- Biaya pengadaan awal : rendah
- Konstruksi kuat dan sederhana
- Dapat digunakan untuk tekanan rendah dan menengah.
- Dapat digunakan untuk mengukur tekanan absolut, tekanan relatif (gauge) dan tekanan diferensial.

Kekurangan

- Memerlukan kompensasi temperature
- Tidak dapat digunakan untuk mengukur tekanan tinggi.
- Mempunyai histeresis dan drift yang besar.
- Tidak cocok untuk mengukur tekanan yang dinamis.

E. McLeod Gages

1. Prinsip Operasi

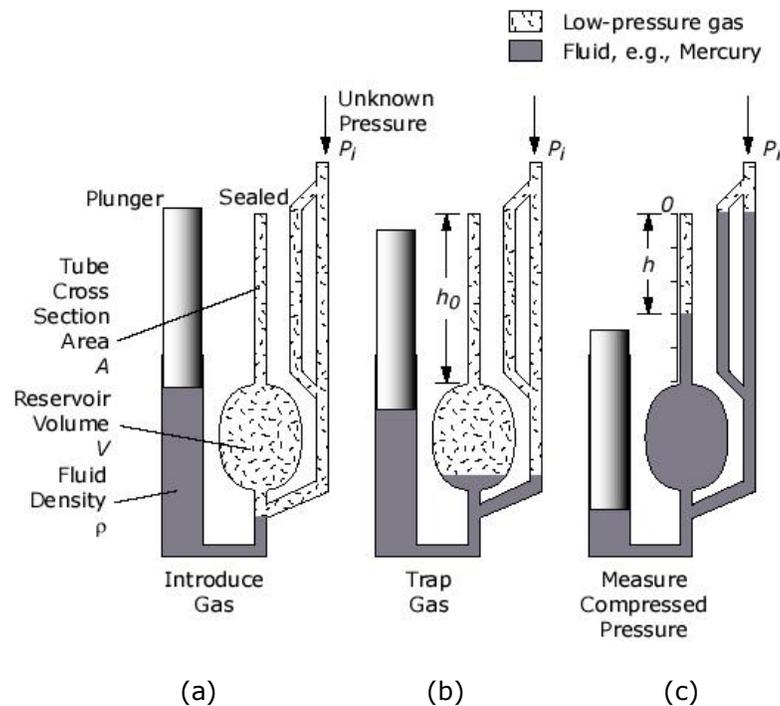
McLeod gage adalah alat ukur tekanan rendah (vakum) dimana tekanan di bawah 10^{-4} torr (10^{-4} mmHg, 1.33×10^{-2} Pa, 1.93×10^{-6} psi) yang bekerja berdasarkan tinggi kolom cairan. Alat ukur ini sering digunakan sebagai kalibrator alat ukur tekanan vakum lainnya.

Skema McLeod gage dapat dilihat pada gambar 3.68. Alat ini mempunyai dua kaki, dimana pada kaki yang satu terdapat suatu volume yang ukurannya jauh lebih besar dari pada volume pipa. Ujung pipa pada kaki tersebut di atas

tertutup. Alat ini mempunyai torak (piston), yang digunakan untuk mengatur tinggi cairan dalam pipa.

Sebelum pengukuran dilakukan torak ditarik sehingga tinggi cairan berada di bawah lubang yang menghubungkan kedua pipa (gambar 3.68.a). Kemudian tekanan vakum yang akan diukur dihubungkan pada pipa lainnya, sehingga tekanan vakum yang diukur mengisi semua pipa.

Setelah pengisian terjadi, torak ditekan sehingga cairan memasuki semua pipa. Tekanan vakum yang berada pada kaki pertama akan terperangkap pada pipa yang tertutup (gambar 3.68.b). Torak terus ditekan sehingga tinggi cairan pada pipa kedua mencapai skala 0, yaitu sama dengan tinggi pipa tertutup. Tinggi cairan pada kaki pertama akan lebih rendah dari kaki kedua, karena tekanan vakum di kaki tersebut akan terkompresi menjadi lebih tinggi dari tekanan vakum yang diukur.



Gambar 3.69. Prinsip Kerja McLeod Gages

Hukum boyle, yang diusulkan oleh Robert Boyle pada tahun 1662, menyatakan bahwa pada sistem isothermal yang tertutup (temperatur yang tetap), maka produk dari pressure (P) dan volume (V) adalah tetap.

$$P \cdot V = \text{constant}$$

Atau setara dengan :

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2$$



Umpamakan bahwa tekanan awal dan volume di dalam McLeod Gage diberi oleh,

$$P_1 = P_i$$

$$V_1 = V + A \cdot h_0$$

dimana V adalah volume reservoir dan A adalah luas penampang dari tabung yang disegel (tertutu).

Misalkan volume dan tekanan yang akhir pemampatan diberi oleh persamaan,

$$P_2 = P_{gage}$$

$$V_2 = A \cdot h$$

Menurut Hukum Boyle, maka :

$$P_i \cdot (V + A \cdot h_0) = P_{gage} \cdot A \cdot h$$

Untuk bentuk manometer, $P_{gage} = P - P_{Ref} = \rho gh - P_i$, maka tekanan yang tidak diketahui P_i dapat turunkan menjadi suatu fungsi dari perbedaan tingginya h.

$$P_i = \frac{\rho gh^2}{V + A(h_0 - h)}$$

Selanjutnya, volume dari reservoir pada umumnya lebih besar dari tabung,

$$V \gg A \cdot (h_0 - h)$$

Sehingga persamaan dapat disederhanakan menjadi :

$$P_i \approx \frac{\rho gh^2}{V}$$



3.5. Pengukuran Temperature (Temperature Measurements)

3.5.1. Umum

Temperature adalah ukuran panas atau dingin suatu benda. Kulit manusia mampu merasakan apakah suatu benda panas atau dingin, namun rasa panas atau dingin tersebut relatif terhadap temperature kulit itu sendiri (tidak dapat teramati secara kuantitatif).

Temperature adalah besaran relative, tergantung pada acuan yang digunakan. Berbagai besaran temperature menggunakan suatu acuan sebagai harga dasarnya. Beberapa sifat fisika benda yang digunakan sebagai acuan pengukuran temperature dicantumkan pada tabel di bawah.

Acuan	Temperature (oC)
Titik didih Hidrogen (H)	-252.78
Titik didih Nitrogen (N)	-195.81
Titik beku Air raksa (Hg)	-38.87
Titik beku Air (H ₂ O)	0
Titik didih Air (H ₂ O)	100
Titik didih Sulfur (S)	444.60
Titik cair Perak (Ag)	950.5
Titik cair Emas (Au)	1063.0

Temperature Conversion Formulas

To Convert From	To	Substitute in Formula
Degrees Celsius	Degrees Fahrenheit	$(^{\circ}\text{C} \times 9/5) + 32$
Degrees Celsius	Kelvin	$(^{\circ}\text{C} + 273.16)$
Degrees Fahrenheit	Degrees Celsius	$(^{\circ}\text{F} - 32) \times 5/9$
Degrees Fahrenheit	Degrees Rankin	$(^{\circ}\text{F} + 459.69)$

3.5.2. Macam Prinsip Alat Ukur Temperatur

Besaran temperature tidak diukur secara langsung. Ukuran temperature selalu berdasarkan perubahan sifat fisik benda tertentu akibat pengaruh perubahan temperature. Berbagai perubahan yang digunakan sebagai prinsip dasar suatu termometer, antar lain :

1. Perubahan dimensi benda, misalnya :
 - a. Termometer cair dalam bulb (termometer air raksa), berdasarkan prinsip perubahan volume cairan dalam bulb jika dihubungkan dengan medium pada temperature tertentu yang ingin diketahui.
 - b. Termometer bimetal, berdasarkan perbedaan koefisien ekspansi dua buah plat logam yang direkatkan.

2. Perubahan tegangan listrik, berdasarkan perbedaan sifat termoelektrik dua buah bahan, misalnya : thermocouple.
3. Perubahan tahanan listrik suatu benda, misalnya : RTD dan Thermistor.
4. Perubahan tekanan cairan dalam bulb, misalnya pressure termometer.

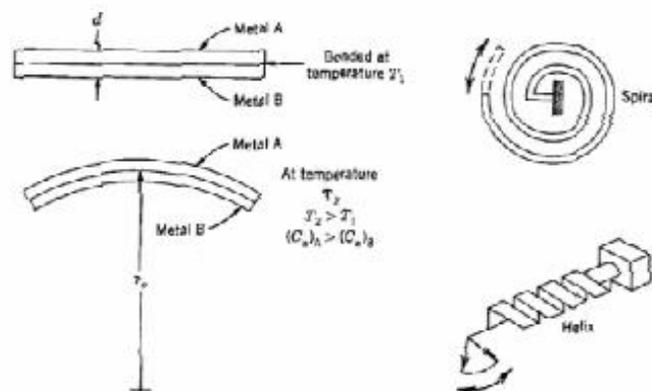
3.5.3. Alat Ukur Temperatur

A. Bimetal Thermometer

1. Teori Bimetal Thermometer

Termometer ini terdiri dari dua logam dengan koefisien muai atau ekspansi berbeda yang dilekatkan menjadi satu. Logam yang mempunyai koefisien ekspansi lebih besar akan mempunyai pertambahan dimensi yang lebih besar dari logam lainnya akibat kenaikan temperature. Sehingga menyebabkan batang bimetal berdefleksi pada arah tertentu, penurunan temperatu menyebabkan defleksi pada arah yang berlawanan. Simpangan batang digunakan untuk menyatakan ukuran temperatu di sekitar batang bimetal.

Untuk mendapatkan sensitivitas yang lebih besar, maka dipilih bahan A yang mempunyai koefisien ekspansi besar dan bahan B mempunyai koefisien ekspansi kecil. Contoh : bahan bimetal terbuat dari paduan bahan invar (campuran besi-nikel) yang mempunyai koefisien ekspansi kecil dengan bahan kuningan yang mempunyai koefisien ekspansi besar.



Gambar 3.70. Prinsip Operasi dari Bimetal Thermometer

2. Spesifikasi Umum

Bimetal thermometer digunakan secara luas di dalam industri proses sebagai indicator lokal dari temperatur proses. Skala pengukuran dapat dibuat dari (- 100 ~ 1000) °F. Skala pengukurannya adalah linier terhadap range dan range akurasi sekitar $\pm 1/2 \sim \pm 2 \%$ atau lebih tinggi.



Gambar 3.71. Bimetal Thermometer

3. Kelebihan dan Kekurangan

Kelebihan

- Biaya pengadaan awal : rendah
- Tidak mudah rusak.
- Mudah dipasang dan diperbaiki.
- Akurasi : cukup baik
- Range temperature : cukup lebar

Kekurangan

- Terbatas pada pemasangan local
- Hanya sebagai indicator.
- Kalibrasi dapat berubah jika ditangani dengan kasar

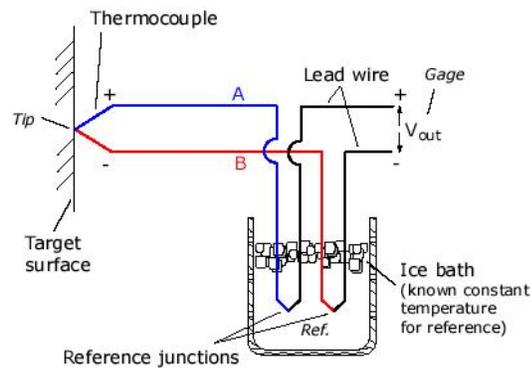
B. Thermocouple

1. Teori Thermocouple

Pada tahun 1821 ahli fisika Germany, Estonian Thomas Johann Seebeck menemukan bahwa suatu konduktor apapun (misalnya metal) akan menghasilkan suatu tegangan (voltage) ketika diberikan gradien thermal. Peristiwa ini dikenal sebagai efek Seebeck atau efek termoelektrik.

Thermocouple adalah suatu sensor temperatur termoelektris yang terdiri dari dua kawat logam yang berlainan (misalnya chromel dan constantan) dengan penggabungannya pada *probe tip* (*measurement junction*) dan *reference junction* (temperature yang diketahui).

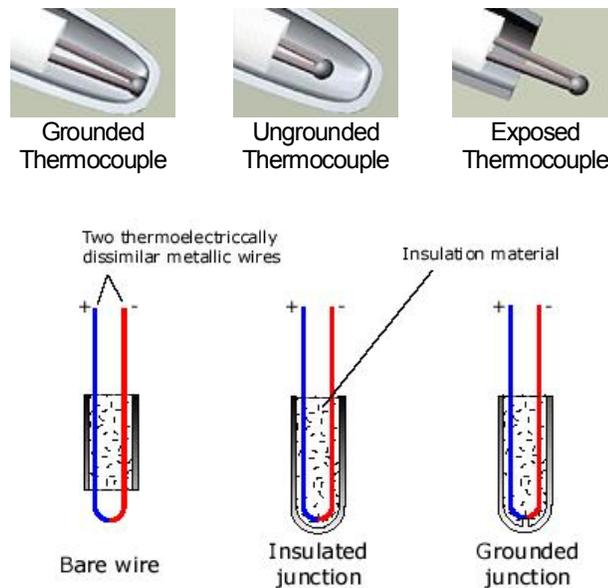
Perbedaan temperatur antara *probe tip* dan *reference junction* dideteksi dengan mengukur perubahan tegangan voltage (*electromotive force, EMF*) pada *reference junction*. Pembacaan absolute temperature kemudian bisa diperoleh dengan kombinasi informasi dari temperatur acuan yang diketahui dengan perbedaan temperature antara *probe tip* dengan *reference*.



Gambar 3.72. Typical Rangkaian Thermocouple

Beberapa jenis-jenis sambungan thermocouple yang umum digunakan adalah sebagai berikut :

Thermocouple Tip Styles



Gambar 3.73. Typical Sambungan Thermocouple

2. Spesifikasi Umum

Secara komersial jenis thermocouple ditetapkan oleh ISA (Instrument Society of America). Jenis E, J, K dan T adalah base-metal thermocouple dan dapat digunakan untuk mengukur temperature hingga 1000°C (1832°F). Jenis S, R dan B adalah noble-metal thermocouples dan dapat digunakan untuk mengukur temperature hingga 2000°C (3632°F). Berikut table spesifikasi dasar dari thermocouple.



ISA	Material (+ & -)	Temperature Range °C (°F)	Sensitivity@ 25°C (77°F) $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ($\mu\text{V}/^\circ\text{F}$)	Error*	App.**
E	Chromel & Constantan (Ni-Cr & Cu-Ni)	-270~1000 (-450~1800)	60.9 (38.3)	LT: $\pm 1.67^\circ\text{C} (\pm 3^\circ\text{F})$ HT: $\pm 0.5\%$	I,O
J	Iron & Constantan (Fe & Cu-Ni)	-210~1200 (-350~2200)	51.7 (28.7)	LT: $\pm 2.2 \sim 1.1^\circ\text{C} (\pm 4 \sim 2^\circ\text{F})$ HT: $\pm 0.375 \sim 0.75\%$	I,O,R,V
K	Chromel & Alumel (Ni-Cr & Ni-Al)	-270~1350 (-450~2500)	40.6 (22.6)	LT: $\pm 2.2 \sim 1.1^\circ\text{C} (\pm 4 \sim 2^\circ\text{F})$ HT: $\pm 0.375 \sim 0.75\%$	I,O
T	Copper & Constantan (Cu & Cu-Ni)	-270~400 (-450~750)	40.6 (22.6)	LT: $\pm 1 \sim 2\%$ HT: $\pm 1.5\%$ or $\pm 0.42^\circ\text{C} (\pm 0.75^\circ\text{F})$	I,O,R,V
R	Platinum & 87% Platinum/ 13% Rhodium (Pt & Pt-Rh)	-50~1750 (-60~3200)	6 (3.3)	LT: $\pm 2.8^\circ\text{C} (\pm 5^\circ\text{F})$ HT: $\pm 0.5\%$	I,O
S	Platinum & 90% Platinum/ 10% Rhodium (Pt & Pt-Rh)	-50~1750 (-60~3200)	6 (3.3)	LT: $\pm 2.8^\circ\text{C} (\pm 5^\circ\text{F})$ HT: $\pm 0.5\%$	I,O
B	70% Platinum/ 30% Rhodium & 94% Platinum/ 6% Rhodium (Pt-Rh & Pt-Rh)	-50~1750 (-60~3200)	6 (3.3)	LT: $\pm 2.8^\circ\text{C} (\pm 5^\circ\text{F})$ HT: $\pm 0.5\%$	I,O

*: LT = Low temperature range, HT = High temperature range

***: I = Inert media, O = Oxidizing media, R = Reducing media, V = Vacuum

Constantan, Alumel, and Chromel are trade names of their respective owners.

3. Kelebihan dan Kekurangan

Kelebihan

- Biaya pengadaan awal : rendah
- Tidak ada bagian yang bergerak (No moving parts)
- Range pengukuran : lebar (0 ~ 5000 oF)
- Response time singkat / pendek
- Repeatability : cukup baik

Kekurangan

- Hubungan temperature dan tegangan tidak linear penuh
- Sensitivitas rendah, umumnya $50 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ($28 \mu\text{V}/^\circ\text{F}$) atau lebih rendah (tegangan rendah rentan dengan noise).
- Accuracy pada umumnya tidak lebih baik dari pada 0.5°C (0.9°F), tidak cukup tinggi untuk beberapa aplikasi.

- Memerlukan suatu acuan temperatur yang dikenal, umumnya temperature air es 0°C (32°F). Modern thermocouple mengacu pada suatu acuan yang dihasilkan secara elektris.

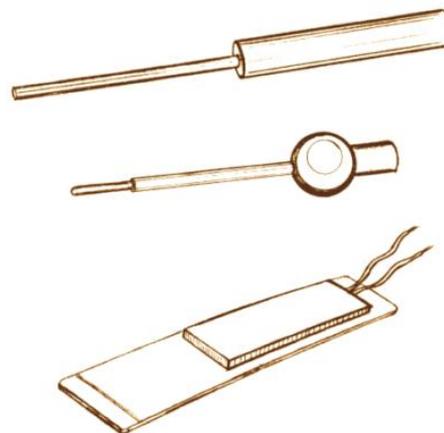


Gambar 3.74. Thermocouple

C. Resistance Temperature Detector (RTD)

1. Teori RTD

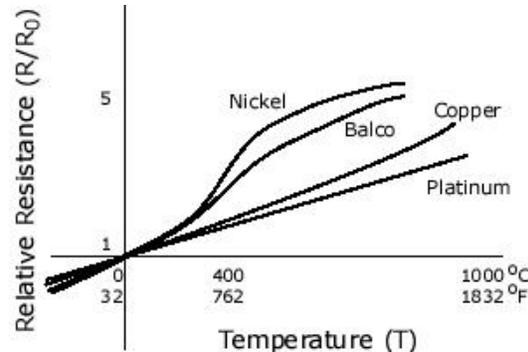
Tahanan (resistance) dari suatu material metal akan berubah terhadap perubahan temperaturnya. Hal ini merupakan suatu dasar metoda deteksi temperature. Bahan yang digunakan untuk sensor ini dibagi menjadi dua macam yaitu bahan konduktor (logam) dan bahan semikonduktor. Bahan konduktor ditemukan terlebih dahulu dan disebut "Resistance-Termometer" sekarang disebut "*Resistance Temperature Detector (RTD)*". Jenis semikonduktor muncul lebih akhir dan diberi nama "*thermistor*".



Gambar 3.75. Resistance Temperature Detector (RTD)

Hubungan Resistance (R) dengan Temperature (T) adalah sangat berperan didalam Resistance Temperature Detector (RTD). Hubungan R-T dari beberapa bahan-bahan RTD digambarkan sebagai berikut dimana y-axis adalah

Resistance yang dinormalisir terhadap Resistance pada 0 °C (32 °F) dan x-axis adalah temperature.

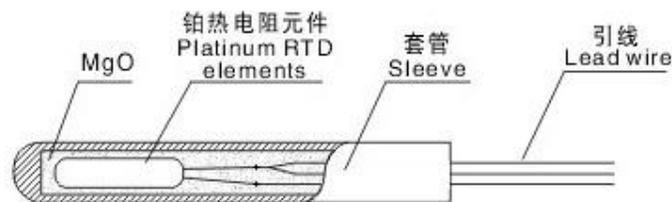


Gambar 3.76. Hubungan Resistance – Temperature

2. Spesifikasi Umum

Secara komersial resistance RTD yang tersedia terbentang dari 10 ~ 25,000 Ω . Lebih umum adalah 100, 200, dan 1000 Ω untuk strain-free platinum probe (> 99.999%) dan 10 Ω copper probe.

Range temperature dari material yang digunakan untuk RTD seperti platinum, copper, nickel, Balco™ (70% Ni-30% Fe) dan tungsten dapat dilihat pada table berikut :



Material	Temperature Range	Note
Platinum (Pt)	-260~1000 °C (-440~1800 °F)	< 550 °C (1022 °F) in most applications
Copper (Cu)	-200~260 °C (-330~500 °F)	
Nickel (Ni)	-200~430 °C (-330~800 °F)	Linearity is not good
Balco (70% Ni-30% Fe)	-100~230 °C (-150~450 °F)	Linearity is not good; cheap to fabricate; high resistance
Tungsten (W)	-100~1200 °C (-150~2200 °F)	



Gambar 3.77. Resistance Temperature Detector (RTD)

3. Kelebihan dan Kekurangan

Kelebihan

- Stabil dan akurat.
- Linearity lebih baik dari pada thermocouples.
- Signal-to-noise ratio : tinggi

Kekurangan

- Biaya pengadaan awal : tinggi (lebih mahal)
- Self heating.
- Membutuhkan sumber arus listrik.
- Response time tidak cukup cepat untuk beberapa aplikasi.

D. Thermistor

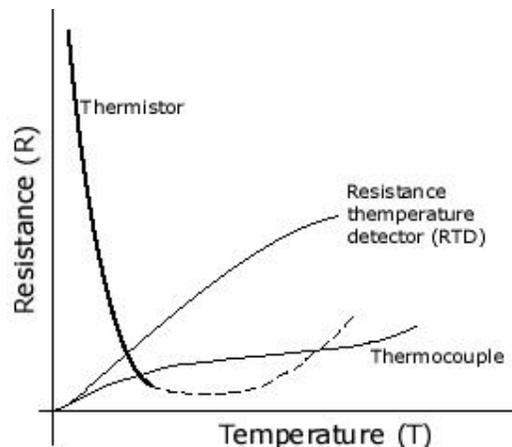
1. Teori Thermistor

Serupa dengan Resistance Temperature Detector (RTD), *thermistor (Bulk Semiconductor Sensor)* menggunakan resistance untuk mendeteksi temperatur. Bagaimanapun, tidak sama dengan RTD metal probe dimana resistance meningkat dengan temperatur, thermistor menggunakan material ceramic semiconductor dimana responya terbalik dengan temperatur. Contoh dari thermistor ditunjukkan pada gambar sebagai berikut.



Gambar 3. 78. Thermistor

Thermistor adalah resistance thermometer, dimana hubungan antara Resistance dan Temperature adalah sangat nonlinear. Resistance berubah secara negatif dan tajam dengan suatu perubahan positif didalam temperature, seperti ditunjukkan pada grafik di bawah.



Gambar 3.79. Kurva karakteristik dari tiga Temperature Transducers

Hubungan Resistance - Temperature pada Thermistor dapat didekatkan dalam bentuk persamaan :

$$R = R_{Ref} \cdot e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{Ref}} \right)}$$

Dimana :

- T = temperature (in kelvin)
- T_{Ref} = reference temperature, umumnya pada temperature kamar (25 °C; 77 °F; 298.15 K)
- R = Resistance dari thermistor (Ω)
- R_{Ref} = Resistance pada T_{Ref}
- β = Konstanta kalibrasi tergantung pada thermistor material, umumnya (3,000 ~ 5,000) K

2. Spesifikasi Umum

Sensor thermistor dapat mengukur temperatur dari $-40 \sim 150 \pm 0.35$ °C ($-40 \sim 302 \pm 0.63$ °F). Bentuk dari thermistor probe dapat berbentuk bead, washer, disk dan rod seperti diperlihatkan pada gambar 3.33. Resistance operasi dari thermistor adalah dalam range k Ohm, walaupun aktual resistance terbentang dalam M Ohm hingga Ohm



Gambar 3.80. Thermistor

4. Kelebihan dan Kekurangan

Kelebihan

- Accuracy tinggi ; $\sim \pm 0.02$ °C (± 0.36 °F). Lebih baik dari pada RTD dan lebih baik lagi dari pada thermocouples.
- Sensitivity tinggi ; ~ 10 . Lebih baik dari pada RTD dan lebih baik lagi dari pada thermocouples. Sebagai hasilnya, kesalahan akibat kabel yang panjang dan self-heating adalah tidak berarti.
- Response time lebih pendek dari RTD, hamper sama dengan thermocouple.
- Stabilitas dan repeatability cukup baik.
- Ukuran lebih kecil dibanding thermocouple

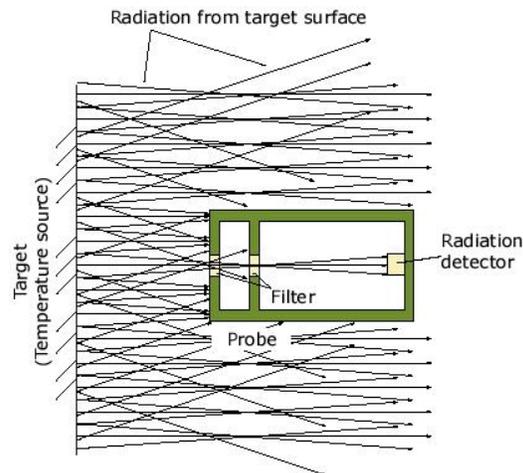
Kekurangan

- Range temperature terbatas $-100 \sim 150$ °C ($-148 \sim 302$ °F).
- Hubungan Resistance - Temperature ; nonlinear, tidak sama dengan RTD dimana mempunyai suatu hubungan yang sangat linier.

E. Pyrometer

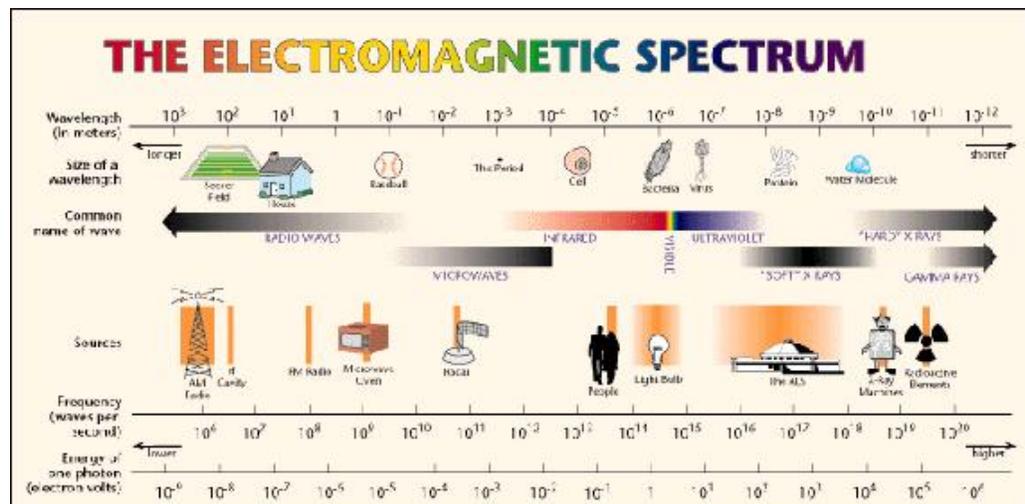
1. Teori Pyrometer

Pyrometer (radiation thermometer) adalah non-contact instrument untuk mendeteksi temperatur permukaan dari suatu obyek dengan mengukur radiasi gelombang elektromagnetic (infrared/visible) yang dipancarkan oleh suatu obyek.



Gambar 3.81. Typical Broadband Pyrometer

Panjang gelombang dari radiasi thermal terbentang dari 0.1 sampai 100 μm ($4 \sim 4,000 \mu\text{in}$), yaitu dari ultraviolet (UV), spectrum sinar tampak (visible spectrum) hingga pertengahan dari infrared (IR).



Courtesy of the [Advanced Light Source, Berkeley Lab \(Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory\)](#)

Gambar 3.82. Electromagnetic Radiation Spectrum

Pyrometry secara harafiah berarti "api / fire" (pyro) dan "mengukur / measuring" (metron). Pyrometer memanfaatkan fakta bahwa semua objek di atas absolut temperature 0 K (- 273.15 ° C; - 459.67 ° F) menyebar dan menyerap energi thermal. Jika hubungan antara intensitas radiasi, panjang gelombang dan temperatur dapat bentuk, maka temperature dapat ditemukan dari radiasi itu.

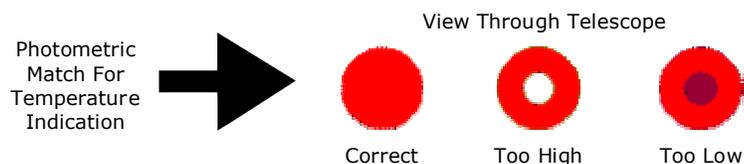
Dua teori yang mendasari pyrometry adalah hukum Planck dan hukum Stefan-Boltzmann. Hukum Planck digunakan didalam narrow-band pyrometer dan Hukum Stefan-Boltzmann digunakan didalam broad-band pyrometer.

3. Spesifikasi Umum

Pyrometer adalah photodetector yang mampu menyerap energi atau mengukur intensitas gelombang electromagnetic pada panjang gelombang tertentu atau dalam suatu range panjang gelombang tertentu. Atas dasar tersebut dikenal dua jenis pyrometer, yaitu :

a. Optical Pyrometer (Brightness Pyrometer atau Disappearing Filament Pyrometer)

- Dirancang untuk radiasi thermal pada spectrum sinar tampak (visible spectrum).
- Menggunakan suatu perbandingan visual antara suatu sumber cahaya yang terkalibrasi dan permukaan yang ditargetkan. Ketika kawat pijar (filament) dan target mempunyai temperature yang sama, intensitas radiasi termal akan match menyebabkan kawat pijar menghilang seperti tercampur kedalam permukaan yang ditargetkan di latar belakang.
- Ketika kawat pijar menghilang, arus yang melintas pada kawat pijar dapat diubah kedalam pembacaan temperatur.



Gambar 3.83. kawat pijar (filament)



Gambar 3.84. Optical Pyrometer

b. Infrared Pyrometer

- Dirancang untuk radiasi thermal didalam daerah infrared ($0.75 \sim 1000 \mu\text{m}$; $30 \mu\text{in} \sim 0.04 \text{ in}$) pada umumnya $2 \sim 14 \mu\text{m}$ ($80 \sim 550 \mu\text{in}$).
- Dibuat dari material pyroelectric, seperti triglisine sulfat (TGS), lithium tantalate (LiTaO_3) atau polyvinylidene fluoride (PVDF).



Gambar 3.85. Infrared Pyrometer

5. Kelebihan dan Kekurangan

Kelebihan

- Pengukuran Non-contact measurement
- Response time : cepat
- Stability : baik

Kekurangan

- Biaya pengadaan awal : tinggi (mahal)
- Akurasi terpengaruh oleh debu dan asap.

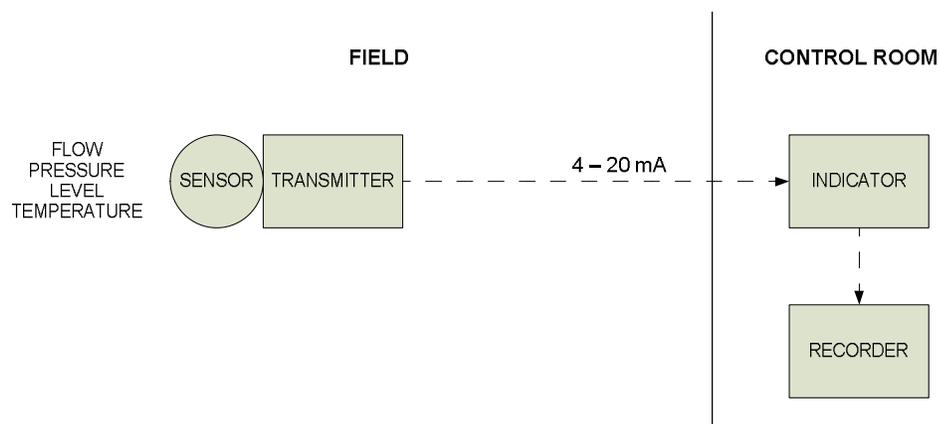
BAB IV

TRANSMITTER, CONVERTER, INSTRUMENT SIGNAL, INDICATOR, CONTROLLER, RECORDER & CONTROL VALVE

4.1. Umum

Di dalam industri proses, untuk memonitor dan mengendalikan jalannya suatu proses diperlukan beberapa informasi besaran fisik. Untuk mendapatkan besaran fisik seperti *flow*, *pressure*, *level* dan *temperature* diperlukan komponen instrumentasi yang secara garis besar dapat dikelompokkan menjadi : *Transmitter*, *Converter*, *Instrument Signal Transmission*, *Indicator*, *Controller*, *Recorder* dan *Control Valve*.

Secara garis besar langkah-langkah monitoring dan pengontrolan suatu proses dapat digambarkan sebagai berikut.

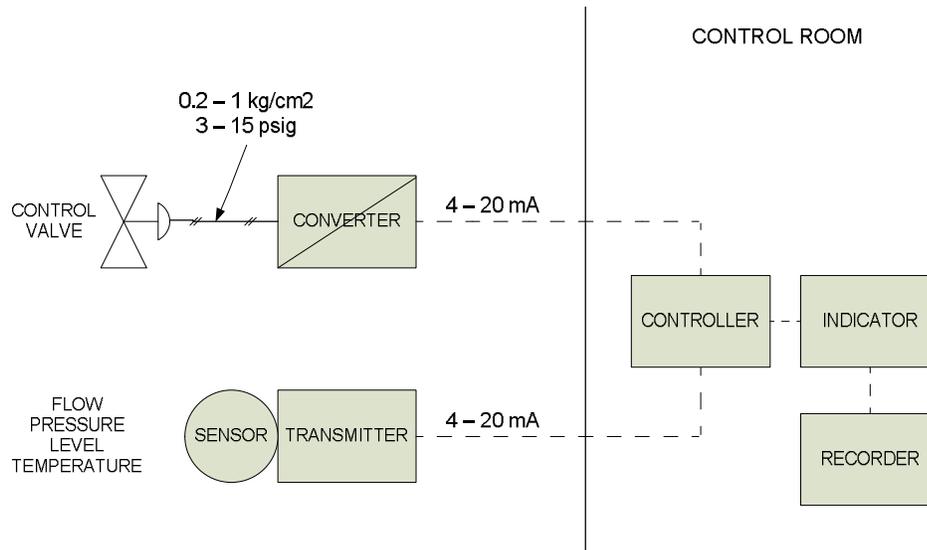


Gambar 4.1. Sistem Monitoring Proses (Open Loop System)

Langkah-langkah pada blok diagram di atas dipergunakan bila hanya diperlukan untuk memonitor besaran fisik dalam suatu proses. Blok diagram seperti di atas dikenal sebagai sistem lingkaran terbuka (*open loop system*).

Pada kenyataannya di dalam suatu proses tidak hanya diinginkan mengetahui atau memonitor besaran fisik tetapi juga mengontrol sehingga berada pada suatu harga tertentu (*set point*) untuk mendapatkan proses yang stabil dan optimal.

Proses pengontrolan suatu besaran fisik biasanya dilakukan pada suatu sistem lingkaran tertutup (*closed loop system*) dengan menambahkan sebuah pengontrol (*controller*) dan final control element (*control valve*) yang digambarkan sebagai berikut.



Gambar 4.2. Sistem Kontrol Proses (Closed Loop System)

4.2. Instrument Signal Transmission

Transmisi data ialah proses pengiriman besaran yang diukur (data) ke tempat lain yang jauh (misalnya dari plant ke ruangan control room pada suatu industri) untuk diperagakan (displaying), direkam (recording) atau mengendalikan (controlling) suatu proses.

4.2.1. Media Transmisi

Pengiriman data (data transmisi) biasa dilakukan dengan cara yaitu :

1. Melalui fluida (tubing).
2. Melalui kawat (cable).
3. Melalui serat optic (fiber optic).

Media Tubing : Prinsip kerja transmisi data menggunakan tubing (pneumatik) adalah berdasarkan pada tekanan dari fluida atau angin sebagai media pembawa data. Jadi di sini data yang dikirimkan berupa perubahan dari tekanan fluida. Tekanan pneumatic yang umumnya digunakan pada transmisi data secara pneumatic adalah antara $3 \sim 15 \text{ psig}$ ($0.1 \sim 1 \text{ kg/cm}^2$).

Media Kabel : Transmisi data melalui kawat (cable) dapat digolongkan berdasarkan besaran pembawa data, yaitu ; arus listrik, tegangan, frekuensi yang dimodulasi, pulsa yang dimodulasi. Transmisi data jenis yang banyak digunakan pada industri proses adalah transmisi dengan arus listrik ($4-20 \text{ mA}$) dan tegangan ($1 - 5 \text{ V DC}$).



Media Fiber Optic : Transmisi data yang paling akhir dikembangkan adalah transmisi data melalui serat optic. Di sini data ditransmisikan dengan cara memodulasi cahaya, dengan perkataan lain di sini sinyal pembawa datanya adalah cahaya. Sistem ini mempunyai kelebihan yaitu sedikit sekali dipengaruhi oleh noise.

4.2.2. Jenis Sinyal Instrumen

Beberapa standar sinyal instrumen yang didefinisikan oleh standards associations atau proprietary standard, meliputi :

a. Analog Signal

- **Pneumatic (signal lines / tubes)**
 - 3 - 15 psig (0.2 – 1 kg/cm²)
 - 20 - 100 kPa
 - 6 - 30 psig
- **Voltage**
 - 1 – 5 V DC
 - 0 – 5 V DC
 - 0 – 10 V DC
- **Current**
 - 4 – 20 mA
 - 8 – 40 mA
 - 10 – 50 mA

b. Digital Signal

- HART Protocol
- SMAR Protocol
- Fieldbus
- Modbus
- Profibus
- Industrial Ethernet
- Berbagai komunikasi tanpa cable (wireless communications)

4.2.3. Pemilihan Sinyal Instrumen

Pemilihan bentuk sinyal pengukuran (sinyal instrumen) sangat ditentukan oleh jenis controller yang akan dipakai (Analog ; pneumatik / elektronik atau Digital). Untuk menerjemahkan sinyal sistem pengukuran dari sensing element menjadi sinyal yang dapat dimengerti oleh controller, dibutuhkan sebuah unit yang disebut transmitter.



Sebagai standarisasi sinyal keluar dari transmitter, baik analog (pneumatic atau elektrik) maupun digital (HART Protocol, SMAR Protocol atau Fieldbus), dibuat hanya bekerja pada standard skala tertentu seperti diperlihatkan pada point jenis sinyal instrumen.

Untuk aplikasi di dalam industri proses, sinyal pneumatik yang digunakan secara umum adalah dengan skala kerja 3 – 15 psig atau 0.2 – 1 kg/cm², dan untuk sinyal elektrik skala kerja 4 – 20 mA (sinyal arus) atau 1 – 5 V DC (sinyal tegangan). Pada umumnya sinyal yang keluar dari transmitter elektronik hampir selalu dalam bentuk 4-20 mA.

Transmisi sinyal elektrik seperti transmisi energi listrik lain, menggunakan kawat tembaga. Diameter kawat tersebut berkisar antara 1.5 ~ 2.5 mm. Sedangkan transmisi sinyal pneumatik hampir selalui menggunakan tubing (pipa kecil) berdiameter dalam 0.25 inci. Atau pada pemakaian tertentu ada yang 0.375 inci.

Tubing dapat terbuat dari plastik, tembaga atau stainless steel. Pemilihan jenis material tubing selalu dikaitkan dengan daerah dimana instrumen beroperasi. Tubing tembaga misalnya tentu tidak akan dipilih untuk bagian terbuka di ladang minyak lepas pantai. Udara laut yang sangat korosif tentu akan mempercepat kerusakan tubing tembaga. Dan tubing platik tentu tidak akan dipakai di daerah dapur (furnace) yang mempunyai temperatu tinggi, karena akan mudah meleleh.

Dalam perkembangannya instrumen sitem pengendalian kemudian banyak memanfaatkan teknologi digital dan perangkat komputer. Untuk itu diperlukan sarana komunikasi dalam bahasa komputer. Selain itu juga ada instrumen-instrumen yang menggunakan sarana komunikasi sinyal radio atau sarana fiber optic. Ketiga jenis sinyal ini sifatnya sangat khusus dan tidak mempunyai standard umum. Bentuk sinyal itu akan sangat tergantung pada kerja sistim unit elektroniknya.

4.3. Transmitter

Transmitter adalah suatu peralatan instrument yang dapat merubah sinyal yang berasal dari instrument ukur (sensor atau detector) menjadi bentuk sinyal yang dapat diterima oleh indicator, recorder dan controller. Terdapat dua type, yaitu ; *Pneumatic Transmitter* dan *Electronic Transmitter*.

4.3.1. Pneumatic Transmitter

A. Prinsip Kerja

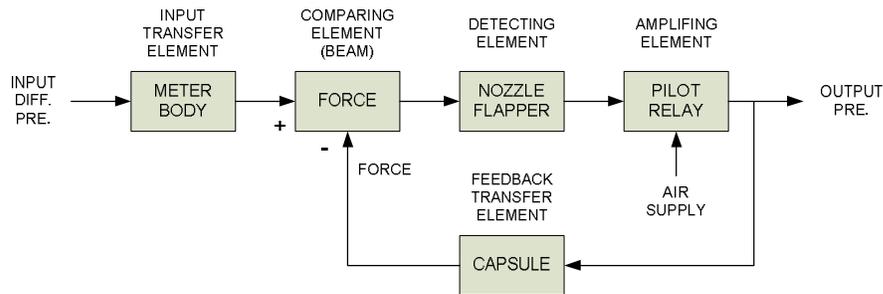
Cara kerja dari alat ini diperlihatkan pada gambar 4.3. Jika tekana input pada meter body naik, maka pada batang torsi (torque rod) akan terjadi kenaikan torsi. Primary beam yang dihubungkan langsung ke batang torsi mengakibatkan buffle (flapper) menutup nozzle.

Pada nozzle terjadi tekanan balik, tekanan balik dari nozzle ini diperkuat oleh amplifier (pilot relay) dan relay output akan mengirimkan sinyal yang telah diperkuat ke receiver (receiver bellows) ataupun instrument lainnya berupa optional external devices. Dalam waktu yang sama, tekanan balik ini juga masuk ke feedback capsul. Kenaikan tekanan output dalam feedback capsul memberikan



gaya feedback ke secondary beam, dan melalui span rider, gaya tersebut menekan primary beam untuk menggerakkan baffle menjauhi nozzle.

Dalam umpan balik loop tertutup akan terjadi gaya perlawanan untuk menghambat / melawan gaya akibat tekanan balik dari nozzle. Pada akhirnya tekanan sinyal output akan sebanding dengan nilai proses variable yang diukur.



Gambar 4.3. Blok Diagram Pneumatic Transmitter

B. Jenis-jenis Pneumatic Transmitter

1. Differential Pressure Type Flow Transmitter



(Foxboro Model 13A, 13H, 15A)
Gambar 4.4. DP type Flow Transmitter

2. Pressure Transmitter (Gauge Pressure)



(Foxboro Model 11GM)
Gambar 4.5. Pressure Transmitter

3. Liquid Level Transmitter (Gauge Pressure)



(Foxboro Model 13F, 13FE)
Gambar 4.6. Liquid Level Transmitter

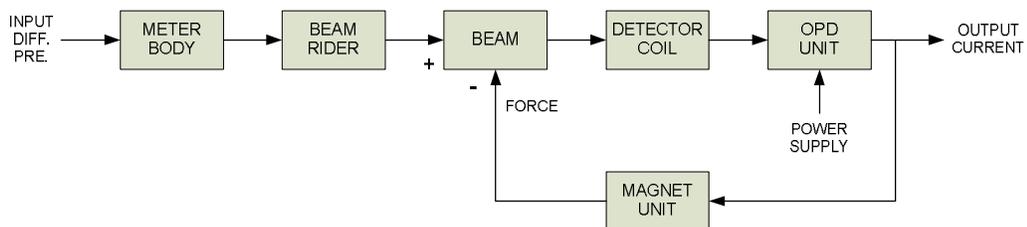
4.3.2. Electronic Transmitter

A. Prinsip Kerja

Transmitter elektronik juga mempunyai mekanisme umpan balik pada sistem keseimbangan gaya untuk mendapatkan ketelitian dan stabilitas yang tinggi.

Sistem ini menjaga tetap suatu keseimbangan gaya antara input dan output. Input sinyal atau variable proses dirubah kedalam suatu gaya melalui input transfer element, output sinyal listrik juga suatu gaya akibat dari feedback transfer element. Output akan berubah, yang disebabkan berubahnya beban, akibatnya keseimbangan dari mekanisme transmitter akan berubah.

Jika hal ini terjadi, maka system akan menjadi seimbang kembali melalui mekanisme umpan balik sebagaimana elemen detektor mendeteksi terjadinya kesalahan. Setiap transfer element mempunyai karakteristik yang linear dan oleh karena itu output juga linear dan seimbang dengan sinyal input



Gambar 4.7. Blok Diagram Pneumatic Transmitter

B. Jenis-jenis Electronic Transmitter

1. Differential Pressure Type Flow Transmitter



(Yokogawa Model EJA110A)
Gambar 4.8. DP Type Flow Transmitter

2. Pressure Transmitter



Gauge Pressure Transmitter
(Yokogawa Model EJA430A)



Absolute Pressure Transmitter
(Yokogawa Model EJA310A)

Gambar 4.9. Gauge Pressure Transmitter

3. Liquid Level Transmitter



Model EJA210A and EJA220A
Flange Mounted DP Transmitters



Model EJA118W, EJA118N and EJA118Y
Diaphragm Sealed DP Transmitters

Gambar 4.10. Gauge Pressure Transmitter

4. Temperature Tansmitter



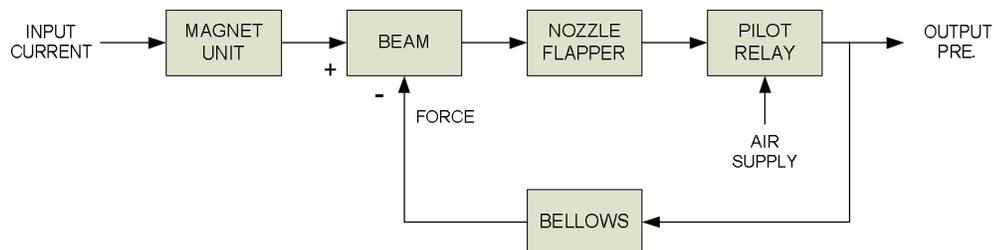
Rosemount 444 Alphaline
Gambar 4.11. Gauge Pressure Transmitter

4.4. Converter

Converter adalah suatu peralatan instrument yang berfungsi merubah besaran sinyal tertentu menjadi besaran sinyal lain. Converter ini diperlukan bila suatu instrument hanya menerima sinyal dengan besaran yang sudah tentu. Bila ada sinyal lain yang tidak sesuai dengan input sinyal instrument tersebut, maka sinyal tadi harus dikondisikan agar sesuai dengan yang dibutuhkan.

4.4.1. I/P Transducer (electropneumatic transducer)

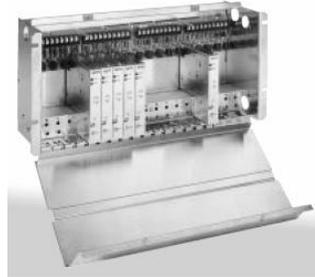
I/P Transducer adalah peralatan instrument yang merubah sinyal arus listrik (4 – 20 mA) menjadi sinyal tekanan pneumatic (3 – 15 psig atau 0.2 – 1 kg/cm²). Terdapat dua tipe yaitu ; Indoor Mount Type dan explosion-proof type.



Gambar 4.12. Blok Diagram I/P Converter

A. Indoor mount type

Digunakan pada daerah yang tidak termasuk dalam klasifikasi explosion area, biasanya dipasang di dalam ruang control.



Model 772R Current-to-Pneumatic Transducing System

Gambar 4.13. I/P Converter type Indoor mounted

B. Explosion-proof type.

Digunakan khusus pada daerah yang termasuk dalam klasifikasi explosion area, biasanya dipasang di lapangan (field).



Moore Model 771



Yokogawa Model PK200



Masoneilan Model 7000



Fisher Model 864

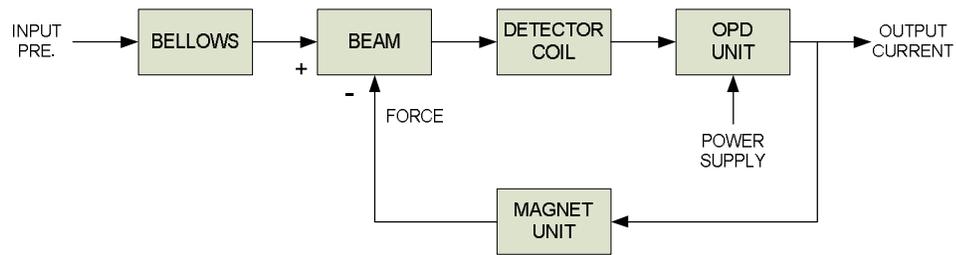


Foxboro Model E69F

Gambar 4.14. I/P Converter Explosion-proof type

4.4.2. P/I Transducer (Pneumatic to Current Transducer)

P/I Transducer adalah peralatan instrument yang merubah sinyal tekanan pneumatic (3 – 15 psig atau 0.2 – 1 kg/cm²) menjadi sinyal arus listrik (4 – 20 mA).



Gambar 4.15. Blok Diagram P/I Converter



Fairchild Model T5700

Gambar 4.16. Pneumatic to Current Converter (P/I Converter)

4.5. Instrument Indicator

Berfungsi untuk memberikan indikasi secara terus menerus variable proses yang diukur pada skala pointer. Indikator ini terdiri atas indicator digital dan indicator analog.

4.5.1. Pneumatic Indicator



Foxboro 130 Series

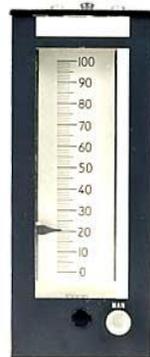


Foxboro 52A Series

Gambar 4.17. Pneumatic Indicator



4.5.2. Electronic Indicator



Foxboro 230S Series

Gambar 4.18. Pneumatic Indicator

4.6. Instrument Recorder

Instrument recorder adalah instrument yang dapat menerima sinyal dari transmitter dan merekam secara terus menerus satu atau lebih dari variable proses pada chart pointer.

4.6.1. Pneumatic Recorder



Honeywell Model Class 15



Foxboro 120 Series

Gambar 4.19. Pneumatic Recorder

4.6.2. Electronic Recorder



Honeywell X Series Recorder

Gambar 4.20. Electronic Recorder



4.7. Instrument Controller

Controller adalah suatu peralatan yang dapat bekerja secara otomatis. Controller memperoleh input informasi dari measuring device yaitu sinyal Process Variable (PV), membandingkan dengan Set Point (SP), menghitung banyaknya koreksi yang diperlukan sesuai dengan algoritmanya (P, PI, dan PID), dan kemudian memutuskan atau mengeluarkan sinyal koreksi (Manipulated Variable / MV) untuk ditransmisikan ke Control Valve.

Controller dapat berupa pneumatic controller, electronic controller atau controller digital yang terkomputerisasi dengan kemampuan dapat melaksanakan tugas-tugas kontrol yang cukup rumit.

4.7.1. Pneumatic Controller

A. Local Controller



Foxboro 40P Controller, Indicating & Recording



Foxboro 43AP Controller / Indicating

Gambar 4.21. Local Pneumatic Controller

B. Panel Controller



Foxboro 110 Controller

Gambar 4.22. Panel Pneumatic Controller

4.7.2. Electronic Controller

A. Single Loop Controller



Moore Model 352

Gambar 4.23. Single Loop Controller

B. Multi Loop Controller



Foxboro 760 Series

Gambar 4.24. Multi Loop Controller

4.8. Control Valve

4.8.1. Umum

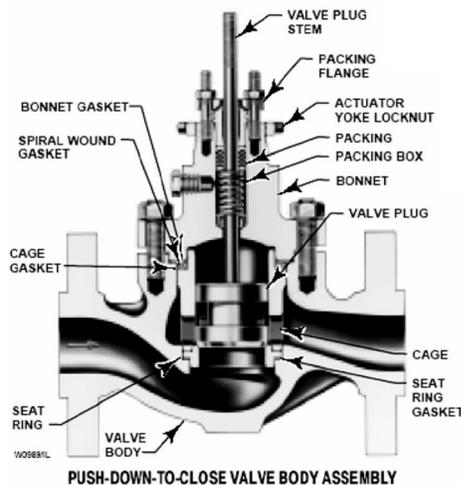
Didalam sistem pengendalian suatu proses industri, salah satu elemen sistem kontrol yang sangat penting adalah *final control element (control valve)*. Pentingnya menggunakan ukuran control valve yang benar harus merupakan penekanan didalam desain suatu sistem kontrol agar tujuan pengendalian suatu proses dapat terpenuhi.

Ukuran control valve yang terlalu kecil tidak akan bisa melaksanakan tugas, dan harus diganti dengan yang lebih besar. Ukuran yang terlampau besar akan menyedot biaya awal lebih besar serta biaya pemeliharaan yang cukup besar.

Dilihat dari segi operasinya valve yang over size akan memberikan fungsi control yang tidak baik dan dapat menyebabkan ketidak stabilan system. Suatu controller yang mahal, sensitive dan akurat akan menjadi tidak berarti jika control valve tidak dapat mengoreksi aliran secara benar untuk menjaga titik control.

4.8.2. Control Valve Body

Berbagai macam bentuk body control valve telah dikembangkan berberapa tahun yang lalu, namun secara garis besar valve dapat diklasifikasikan ke dalam dua kelompok berdasarkan kepada cara penutupan, yaitu gerak linear dan gerak rotasi. Berikut disampaikan ilustrasi beberapa body control valve yang populer penggunaannya saat ini.



Gambar 4.25. Valve Body Assembly

A. Globe Valves

1. Single-Port Valve Body

Kelebihan dan Kekurangan

Kelebihan

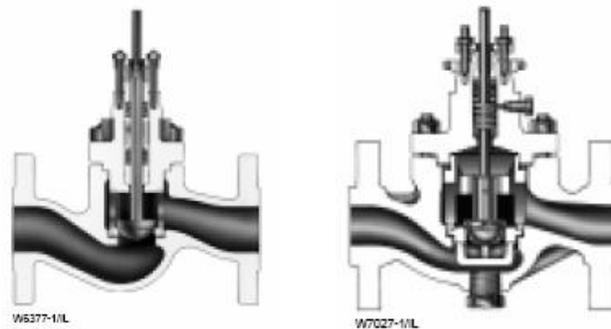
- Rangeability : tinggi
- Tight shutoff : kebocoran sangat kecil atau tidak ada pada saat control valve dalam kondisi baru atau baik.
- Tersedia plug yang dapat dibalik (reversible)
- Sering digunakan dalam ukuran di bawah 2 inches

Kekurangan

- Control Valve dengan disain “unbalanced” membutuhkan actuator yang relative lebih besar.
- Mempunyai karakteristik Low Pressure Recovery.

a. Popular Single-Ported Globe-Style Valve Body

Control Valve ini digunakan secara luas pada aplikasi pengendalian proses, terutama untuk ukuran 1 ~ 4 inch.



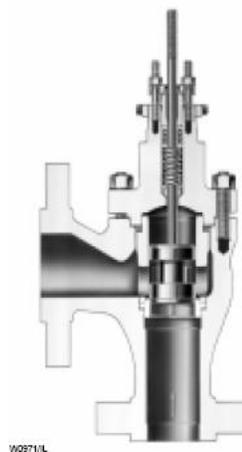
Single-ported Globe

Single-seated Globe

Gambar 4.26. Popular Single-Ported Globe-Style Valve Body

b. Flanged Angle-Style Control Valve Body

Bentuk angel valve hampir selalu single-port, biasanya digunakan di dalam aplikasi feedwater dan heater drain.

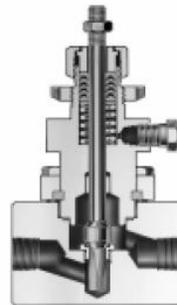


Gambar 4.27. Flange Angle-Style Control Valve Body



c. Bar Stock Valve Bodies

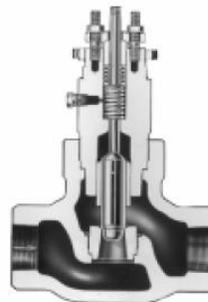
Control Valve ini sering digunakan untuk aplikasi korosif di dalam industri kimia.



Gambar 4.28. Bar Stock Valve Bodies

d. High Pressure Globe-Style Control Valve Body

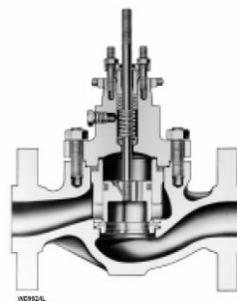
High pressure single-ported globe valve sering digunakan untuk aplikasi dalam produksi minyak dan gas. Flanged tersedia dalam rating class 2500.



Gambar 4.29. High Pressure Globe-Style Control Valve Body

e. Ballanced-Plug Cage-Style Valve Bodies

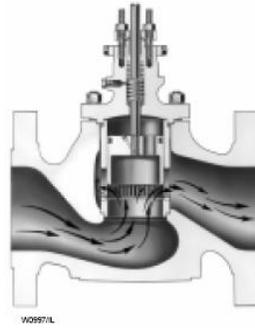
Control valve ini tersedia dalam size hingga 20 inch dengan pressure rating class 2500.



Gambar 4.30. High Pressure Globe-Style Control Valve Body

f. High Capacity, Cage-Guided Valve Bodies

Control valve ini dirancang untuk aplikasi yang menimbulkan noise seperti pada station penurunan tekanan dari gas bertekanan tinggi dimana kecepatan sonic (*sonic velocity*) dari gas sering ditemui pada keluaran valve bila menggunakan control valve konvensional.



Gambar 4.31. High Capacity, Cage-Guided Valve Bodies
Noise Abatement Trim

2. Double-Port Valve Body

Control valve jenis double-port ini secara normal hampir semua di- assembled dengan aksi plug valve secara *push-down to open (reverse)*, namun dapat juga dirakit dengan aksi *push-down to closed (direct)*. Control valve ini dirancang untuk digunakan untuk fluida dengan viskositas tinggi, kotor, terkontaminasi atau proses yang mengakibatkan deposit pada trim valve.

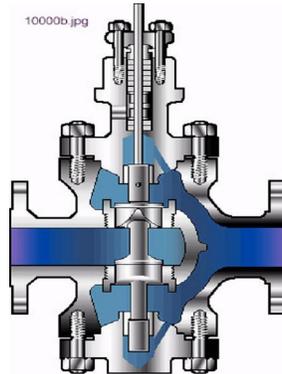
Kelebihan dan Kekurangan

Kelebihan

- Kapasitas flow : tinggi dibanding dengan single port valve pada ukuran yang sama.
- Rangeability : tinggi
- Control Valve dengan disain "unbalanced" membutuhkan actuator yang relative lebih kecil dibanding single port.
- Tersedia plug yang dapat dibalik (reversible)
- Sering digunakan dalam ukuran di atas 2 inches

Kekurangan

- Rate kebocoran (leakage) pada saat shutoff relative tinggi,
- Mempunyai karakteristik Low Pressure Recovery.
- Erosi terjadi pada aplikasi high pressure drop dalam kaitan dengan karakteristik kebocoran.
- Tidak baik untuk flow yang tinggi, aplikasi low pressure drop.



Gambar 4.32. Reverse-Acting Double-Ported Globe-Style Valve Body

3. Three-Way Valve Bodies

Three way valve dirancang untuk digunakan pada aplikasi sebagai pemecah (diverting) aliran fluida dan sebagai penyatuh (blending) aliran fluida.

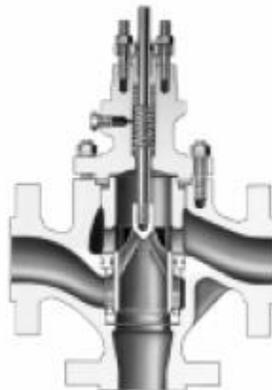
Kelebihan dan Kekurangan

Kelebihan

- Baik untuk aplikasi blending atau diverting
- Dapat menggantikan 2 two-way valve pada aplikasi tertentu.
- Sering digunakan untuk sistem kontrol temperatur heat exchanger.

Kekurangan

- Tidak bias mengendalikan total flow.
- Bila diinginkan ukuran port yang berbeda, maka tidak tersedia.
- Harus diketahui kondisi flow dengan tepat.



Gambar 4.33. Three Way Valve with Balanced Valve Plug

B. Rotary Valves

1. Butterfly Valve Bodies



Gambar 4.34. Typical Butterfly Control Valve

Kelebihan dan Kekurangan

Kelebihan

- Kapasitas : besar
- Hemat, terutama pada ukuran yang besar
- Mempunyai karakteristik High Pressure Recovery.
- Low pressure drop melalui valve
- Baik untuk service "slurry"
- Membutuhkan space yang minimum untuk instalasi.
- Tersedia dalam ukuran besar (hingga 200 inches)

Kekurangan

- Torque tinggi, dibutuhkan actuator besar jika ukuran valve besar atau pressure drop tinggi.
- Tight shut off tergantung pada penggunaan *resilient seat* dimana temperaturnya terbatas.
- Throttling travel terbatas hingga 60°

2. V-Notch Ball Control Valve Bodies



Gambar 4.35. Rotary-Shaft Control Valve with V-Notch Ball

Kelebihan dan Kekurangan

Kelebihan

- High capacity
- Karakteristik control : baik
- Rangeability : baik
- Baik untuk service "slurry"

Kekurangan

- Operating pressure : terbatas
- Tidak baik untuk high pressure drop.

3. Eccentric-Plug Control Valve Bodies



Gambar 4.36. Eccentric-Plug Control Valve

4. Eccentric-Disk Control Valve Bodies



Gambar 4.37. Eccentric-Disk Rotary-Shaft Control Valve

4.8.3. Karakteristik Aliran - Valve Plug

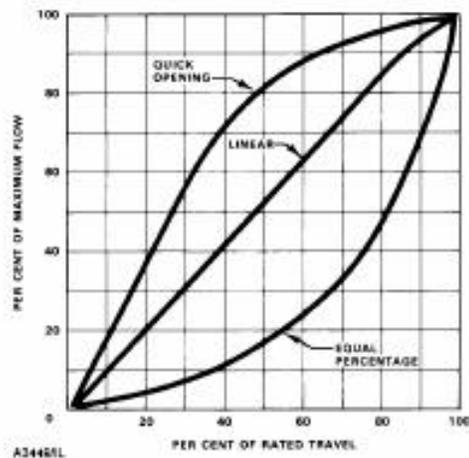
Valve plug adalah bagian yang bergerak dari control valve yang mengatur aliran melalui control valve tersebut. Sedangkan yang dimaksud dengan karakteristik aliran (*flow characteristic*) dari valve plug adalah hubungan antara persentase laju aliran (*flow rate*) yang melalui control valve dengan persentase pergerakan valve plug pada drop tekanan yang konstan.

Dikenal ada tiga macam karakteristik aliran dari valve plug, yaitu :

- Linear Flow
- Equal-percentage Flow
- Quick-opening Flow



Gambar 4.38. Characterized Cages for Globe-Style Valve Bodies



Gambar 4.39. Inherent Flow Characteristics Curves

4.8.4. Actuator

Aktuator (*actuator*) adalah bagian dari control valve yang menjadi penggerak untuk mengatur pergerakan batang katup valve (*valve stem*), yang dihubungkan dengan plug untuk mengatur aliran melalui control valve tersebut.

Dikenal ada enam jenis actuators, yaitu :

- Spring and Diaphragm actuators
- Piston Actuators
- Electrohydraulic Actuators

- Manual Actuators
- Rack and Pinion Actuators
- Electric Actuators

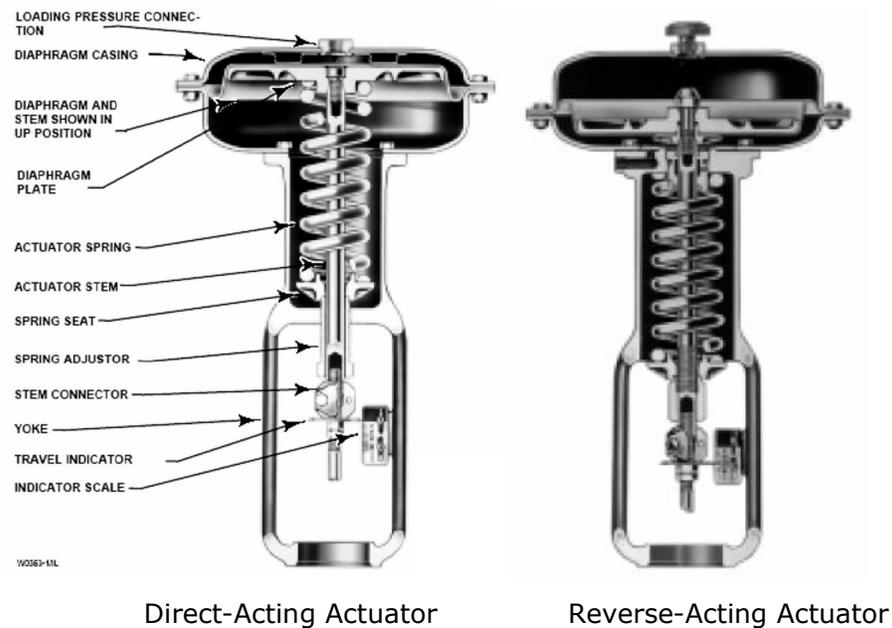
A. Spring and Diaphragm actuators

Gambar 4.37 memperlihatkan suatu actuator pegas dan diaphragm. Jenis ini adalah disain actuator yang paling tua dan masih merupakan jenis paling banyak digunakan.

Disain sistem ini adalah *failsafe* yaitu jika ada kegagalan pada supply udara (*air supply*), maka pegas akan bergerak sehingga valve akan terbuka atau tertutup tergantung keadaan yang telah dipilih.

Actuator pegas dan diaphragm dapat dibuat agar berfungsi sebagai *direct acting* (yaitu dengan meningkatkan tekanan udara maka diaphragm akan tertekan ke bawah sehingga actuator stem semakin panjang) atau *reverse acting* (yaitu dengan meningkatkan tekanan udara maka diaphragm akan tertekan ke atas sehingga actuator stem semakin pendek).

Beberapa factor yang membatasi actuator diaphragm melibatkan kombinasi dari ; ukuran, tekanan, gaya, dan langkah (*stroke*). Untuk memperoleh gaya yang besar diperlukan suatu diameter yang besar, akan tetapi makin besar diameternya, makin kecil tekanan yang didapat. *Stroke* juga dibatasi dan dipengaruhi oleh ukuran. Sebagai akibatnya banyak batasan-batasan agar pemakaiannya menjadi ekonomis.



Gambar 4.40. Spring and Diaphragm Actuators

Kelebihan dan Kekurangan

Kelebihan

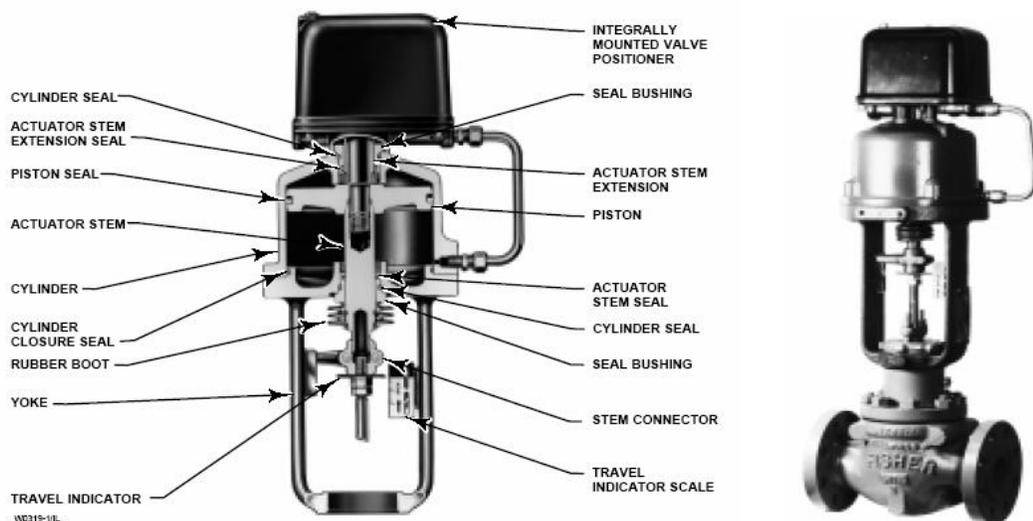
- Sederhana dan mudah dipelihara (maintain)
- Biaya pengadaan awal relative murah (ekonomis)
- Aman untu area hazardous
- Response time : cepat dan cukup baik untuk sebagaian besar aplilkasi.

Kekurangan

- Tidak cukup cepat untuk beberapa aplikasi
- Untuk beberapa aplikasi yang mempersyaratkan actuator yang besar sulit dipenuhi.

B. Piston or Cylinder actuators

Aktuator jenis ini terdiri dari suatu piston yang dioperasikan pada silinder bertekanan tinggi.



Gambar 4.41. Control Valve dengan Double-Acting Piston Actuator.

Kelebihan dan Kekurangan

Kelebihan

- Positioningnya relatif tepat sehubungan dengan sinyal kontrol.
- Response time : relatif cepat
- Dapat mengakomodir persyaratan kekuatan batang (stem) yang besar
- Aman untu area hazardous

Kekurangan

- Membutuhkan tekanan air supply yang tinggi.
- Harga lebih mahal dibanding jenis spring – diaphragm
- Kadang-kadang sulit untuk mencapai kondisi fail-safe.

C. Electrohydraulic Actuators

Actuator electrohydraulic ini membutuhkan daya listrik untuk motor dan suatu masukan electrical signal dari controller. Aktuator ini adalah ideal untuk aplikasi sistem kontrol di lokasi yang terisolasi dimana sumber tekanan pneumatik tidak tersedia namun persyaratan pengendalian yang tepat untuk posisi valve plug diperlukan.



Gambar 4.42. Control Valve dengan Double-Acting Electrohydraulic Actuator dan Handwheel.

Kelebihan dan Kekurangan

Kelebihan

- Response time : sangat cepat
- Penggunaan tenaga dimaksimalkan dalam pergerakannya.
- Akurasi positioning dari valve : tepat
- Positioningnya relatif tepat sehubungan dengan sinyal kontrol.

Kekurangan

- Biaya pengadaan awal : tinggi (mahal)
- Sistem hidrolik memerlukan sistem pemasangan pipa dengan filter yang baik dan bersih.
- Lebih sulit dipelihara

D. Electric Actuators



Gambar 4.43. Electric Valve Operator

Kelebihan dan Kekurangan

Kelebihan

- Ekonomis bilamana air instrument tidak tersedia.

Kekurangan

- Response time : lambat
- Lebih mahal dibandingkan dengan pneumatic actuator.
- Lebih sulit dipelihara di area hazardous

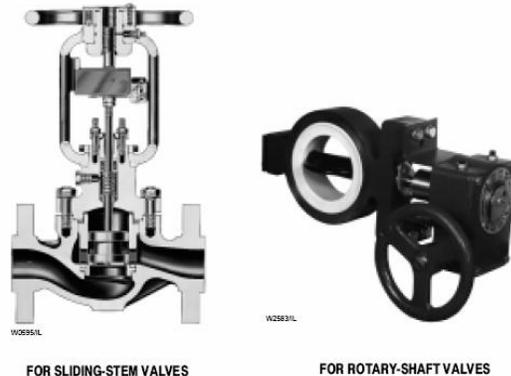
E. Rack and Pinion Actuators

Rack and pinion actuators didisain untuk menyediakan suatu solusi hemat dan kompak untuk rotary shaft valve. Bentuk ini digunakan untuk aplikasi on-off control.



Gambar 4.44. Rack and Pinion Actuator

F. Manual Actuators



Gambar 4.45. Control Valve dengan Double-Acting Electrohydraulic Actuator dan Handwheel.

4.8.5. Control Valve Accessories

A. Positioners

Salah satu fungsi dari valve positioner adalah agar batang plug (*plug stem*) yang digerakkan oleh actuator diaphragm dapat bergerak secara linear. Juga sebagai penguat daya (*power amplifier*) untuk memberikan response yang cepat dari pergerakan plug stem. Namun kadang-kadang pemakaian positioner ini dapat membuat keadaan control loop menjadi tidak stabil atau control loop akan stabil apabila tanpa menggunakan positioner.

Ketidak stabilan di atas terjadi karena pada umumnya penggunaan positioner secara menyeluruh akan menambah konstanta waktu dari control loop tersebut, dimana hal ini akan memberikan kesulitan dalam pencapaian kondisi stabil dari pengontrolan.

Pemakaian positioner akan berhasil dengan baik apabila kombinasinya dengan control valve tersebut akan memberikan response time lebih cepat dari prosesnya itu sendiri.

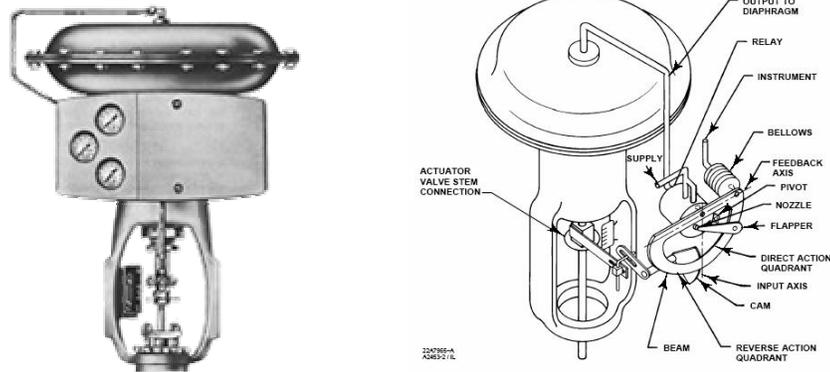
Aplikasi secara umum yang harus menggunakan valve positioner antara lain sebagai berikut bilamana :

- Aplikasi split range control, yang memerlukan valve stroke yang penuh dari beberapa range sinyal kontrol (3 - 15 psig sinyal output untuk 3 - 9 psig sinyal input dari positioner)
- Diperlukan load pressure lebih besar dari 20 psig.
- Diperlukan sistem kontrol yang jauh lebih baik (minimum overshoot dan fast recovery).
- Diperlukan reverse action dari control valve.

- Pada valve dengan ukuran 6 inches atau lebih
- Transmission line panjang.
- Pessure drop diantara upstream dan downstream valve tinggi (100 psi atau lebih).
- Pada aplikasi temperatur tinggi.
- Bilamana friksi yang berlebihan terjadi pada packing glands dan guides.
- Pada services "sludge" dimana dapat menyebabkan pergerakan stem dan guides lengket (*sticky*).

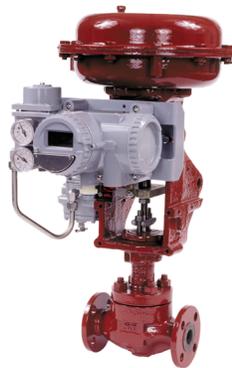
Ada dua jenis valve positioner yaitu ; pneumatic positioner dan electropneumatic positioner (smart positioner).

a. Pneumatic Positioner



Gambar 4.46. Pneumatic Positioner

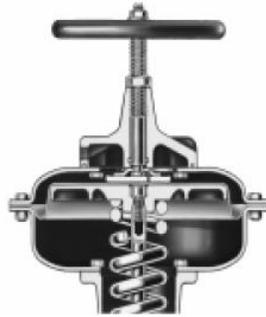
b. Electro-pneumatic (smart) Positioner



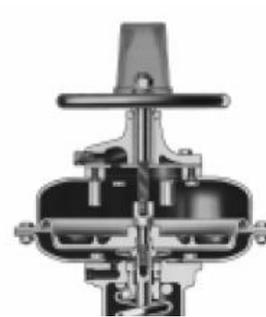
Gambar 4.47. Electro-pneumatic (smart) Positioner



B. Hand Wheel



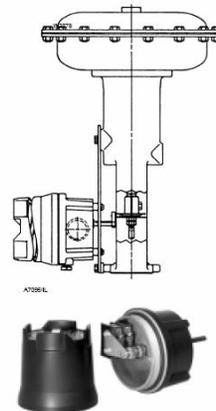
Top-Mounted Hand Wheel for Direct-Acting Diaphragm Actuator



Top-Mounted Hand Wheel for Reverse-Acting Diaphragm Actuator

Gambar 4.48. Hand Wheel

C. Limit Switches



Gambar 4.49. Electro-pneumatic (smart) Positioner

D. Solenoid Valve



Gambar 4.50. Solenoid Valve



E. Supply Pressure Regulator



Gambar 4.51. Supply Pressure Regulator

4.8.6. Koefisien Valve Sizing (Cv)

A. Umum

Pada tahun 1952, Fluid Controls Institute, Inc. (FCI) mulai melakukan studi / percobaan dalam rangka menstandarisasi formula dan metoda test untuk menentukan control valve sizing (Cv). Ini disebabkan karena formula yang dapat digunakan untuk menentukan control valve sizing beraneka ragam, sehingga menyebabkan kebingungan antar manufacturer dan pemakai (user).

Pada awal tahun 1960, Fluids Control Institute mencapai suatu kesepakatan dan mempublikasikan formula yang dikenal sebagai FCI equitation untuk menghitung ukuran valve yang digunakan untuk fluida compressible dan incompressible. Range dari service condition yang bisa diakomodasikan dengan teliti oleh persamaan ini sangat sempit sehingga standard ini tidak mencapai suatu tingkat kesepakatan untuk diterima.

Pada tahun 1967, ISA membentuk suatu komite untuk mengembangkan dan mempublikasikan formula standard untuk valve sizing. Usaha dari panitia ini mencapai puncak dimana prosedur valve sizing diterima sebagai American National Standard.

Kemudian, suatu panitia dari International Electrotechnical Commission (IEC) menggunakan hasil kerja ISA sebagai dasar untuk merumuskan standard internasional untuk sizing control valve. Beberapa informasi tentang material dari standard ANSI/ISA S75.01 disadur dengan seijin penerbit ISA. Kecuali beberapa perbedaan dalam hal nomenclature dan prosedur yang berbeda antara ISA dan IEC standard telah diselaraskan.

ANSI/ISA standard S75.01 diselaraskan dengan IEC standard 534-2-1 dan 534-2-2. IEC mempublikasikan 534-2, section 1 untuk fluida incompressible dan section 2 untuk fluida compressible.



Secara defenisi koefisien valve sizing (C_v) adalah **"jumlah gallon air (H_2O) per menit pada temperature 60 °F yang mengalir melalui suatu valve pada posisi terbuka penuh dengan pressure drop sebesar 1 psi"**.

Sebagai contoh ; suatu control valve yang mempunyai koefisien aliran atau koefisien valve sizing (C_v) maksimum sebesar 20, artinya control valve tersebut mempunyai suatu effective port area dalam posisi terbuka penuh sedemikian hingga bisa melewatkan 20 gpm air dengan pressure drop sebesar 1 psi.

Koefisien valve sizing untuk gas dinyatakan sebagai C_g dan koefisien valve sizing untuk steam dinyatakan sebagai C_s . Setiap table koefisien sizing untuk liquid selalu mengandung harga koefisien valve recovery K_m . Harga ini digunakan untuk menentukan drop tekanan yang diperbolehkan untuk tujuan sizing agar diperoleh efek offset dari flashing dan kavitasi.

B. Beberapa Defenisi

1. Persyaratan Kapasitas

Di dalam kalkulasi valve sizing dan valve selection dibutuhkan data-data design, yaitu :

- Flow rate (Q): normal, maximum dan minimum
- Specific gravity (sg)
- Vapor pressure (P_v)
- Viscosity (μ)

2. Design Rate

Design rate adalah istilah menandakan normal flow dimana suatu plant beroperasi pada kapasitas yang diharapkan. Pada saat start-up, upset atau abnormal kondisi lainnya, flow rate sesaat akan bervariasi dari normal flow rate. Control valve biasanya dipilih untuk mengendalikan flow rate dengan bukaan dari 25 – 60 % pada normal rate tersebut. Pembukaannya tergantung pada karakteristik valve trim yang dipilih, perbandingan nilai normal/minimum dan normal/maximum dan C_v rating dari control valve didalam range nilai C_v yang bisa diterima.

3. Maximum Rate

Data mengenai flow rate maksimum dapat dilihat pada mechanical sheet atau process flow sheet. Perlu diingat bahwa dalam rangka pengendalian suatu proses, harus ada suatu kemampuan dari peralatan untuk menyimpang di atas atau di bawah dari flow rate normal yang ditentukan. Namun dengan pemilihan flow rate maximum yang sewenang-wenang dapat mengakibatkan suatu control valve akan terbuka lebar, yang pada akhirnya control valve tidak lagi mengendalikan aliran sebab pada posisi itu aliran masuk secara langsung.

Sumber lain untuk mendapatkan flow rate maksimum dapat dilihat pada kurva pompa, kompresor, kapasitas peralatan lainnya, heating/cooling load serta informasi dari process engineer yang mempunyai pengetahuan mengenai



persyaratan proses. Bagaimanapun jika flow rate maksimum tidaklah diketahui, maka 150 % dari design rate harus digunakan untuk ukuran valve itu.

4. Minimum Rate

Minimum flow rate pada umumnya lebih sukar untuk ditentukan dibanding maksimum flow rate. Bilamana flow rate minimum tidaklah ditentukan, instrumen engineer dan process engineer bertanggung jawab mendiskusikan berbagai aspek dari sistem kontrol untuk menentukan kondisi-kondisi yang mungkin ada selama startups dan upset.

Pengendalian pada flow rate rendah kadang-kadang sulit dilakukan oleh karena ΔP paling tinggi pada kondisi ini. Kebanyakan single port valve control valve dapat mengendalikan dengan aman menuju 3 atau 4 % dari rated capacity. Sedangkan double port control valve mungkin kesulitan mengendalikan karena mempunyai tingkat kebocoran lebih tinggi dari minimum rate yang diinginkan (1- 2%) dari rated capacity.

C. FCS Equations

1. Formula untuk Liquid (Non Compressible Fluids)

a. Volume basis :

$$C_v = Q \sqrt{\frac{G}{\Delta P}}$$

Dimana :

- Cv = Valve flow coefficient
- Q = Maximum flow rate of liquid (gpm)
- G = Specific gravity of fluid at flowing temperature (water = 1)
- ΔP = Pressure drop (P1 - P2), psi
- P1 = Valve upstream pressure (psia)
- P2 = Valve down stream pressure (psia)

b. Weight basis :

$$C_v = \frac{W}{500 \sqrt{\Delta P \cdot G}}$$



Dimana :

- Cv = Valve flow coefficient
- W = Maximum flow rate of liquid (lb/h)
- G = Specific gravity of fluid at flowing temperature (water = 1)
- ΔP = Pressure drop (P1 - P2), psi
- P1 = Valve upstream pressure (psia)
- P2 = Valve down stream pressure (psia)

2. Formula untuk Gas and Vapors (Other than Steam)

$$C_g = \frac{Q}{1360} \sqrt{\frac{2 \cdot G \cdot T}{\Delta P \cdot (P1 + P2)}}$$

Dimana :

- Cg = Valve flow coefficient
- Q = Flow of vapors (SCFH)
- G = Specific gravity of fluid at flowing temperature
- T = Flowing temperature (deg. Rankine)
- ΔP = Pressure drop (P1 - P2), psi
- P1 = Valve upstream pressure (psia)
- P2 = Valve down stream pressure (psia)

3. Formula untuk Steam

$$C_s = \frac{W(1.0 + 0.0007 T_{sh})}{2.1 \sqrt{\Delta P \cdot (P1 + P2)}}$$

Dimana :

- Cs = Valve flow coefficient
- W = Flow of fluid (lb/h)
- Tsh = Degrees superheat (deg. F)
- ΔP = Pressure drop (P1 - P2), psi
- P1 = Valve upstream pressure (psia)
- P2 = Valve down stream pressure (psia)

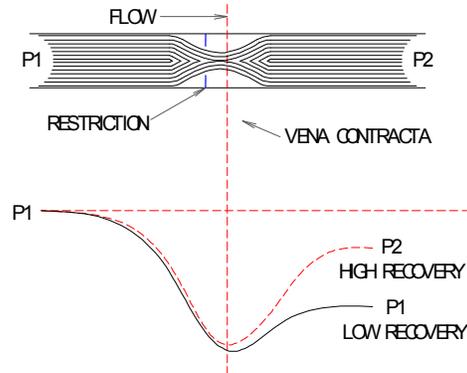
4. Special Condition

a. Flashing dan Kavitasasi

Adanya hambatan (*restriction*) yang diberikan oleh control valve terhadap aliran liquid maka pada bagian hilir (*downstream*) akan terjadi pemampatan aliran. Pada daerah yang pemampatannya paling besar akan terjadi penurunan tekanan yang paling rendah dan kenaikan kecepatan aliran yang paling besar. Titik-titik pada daerah ini disebut vena contracta.

Untuk mempertahankan kestabilan aliran liquid yang melalui control valve, maka pada vena contracta harus memiliki kecepatan yang paling besar karena luas penampangnya terkecil. Sebagai akibat dari hukum kekekalan energi, penambahan kecepatan (energi kinetik) pada vena contracta akan mengakibatkan penurunan tekanan (energi potensial).

Selanjutnya setelah lepas dari vena contracta, aliran liquid akan berekspansi ke dalam daerah yang lebih besar. Kecepatan akan mengecil kembali dan tekanan akan membesar. Akan tetapi dalam kenyataannya tekanan pada hilir (*downstream*) tidak akan pernah mencapai harga yang sama dengan tekanan pada hulu (*upstream*) dari control valve. Akibatnya akan selalu timbul perbedaan tekanan antara hulu dan hilir. *High recovery valve* dan *low recovery valve* yang disebabkan oleh hambatan valve tersebut diperlihatkan pada gambar 4.50.



Gambar 4.52. Perbandingan dari profil tekanan untuk High & Low Recovery pada Vena Contracta

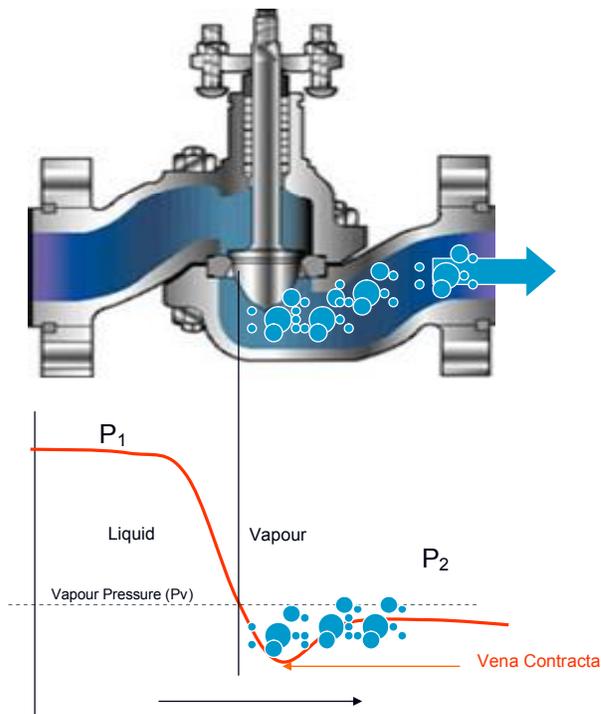
- **Kurva aliran dari karakteristik Flashing**

Sehubungan dengan karakteristik recovery dari valve, apabila harga pressure recovery (P_2) pada vena contracta berada di bawah tekanan uap / *vapor pressure* (P_v) dari liquid tersebut yang diakibatkan adanya kenaikan kecepatan fluida pada titik ini, maka akan terjadi aliran gelembung pada bagian hilir dari control valve. Proses semacam ini dinamakan *flashing*, dan ditunjukkan pada gambar 4.52.

Flashing ini dapat menyebabkan kerusakan erosi pada valve trim part, yang terjadi akibat kecepatan tinggi dari fluida dekat dengan seat line dari valve plug dan seat ring.



Gambar 4.53. Kerusakan yang diakibatkan Flashing



Gambar 4.54. Kurva aliran dari karakteristik Flashing

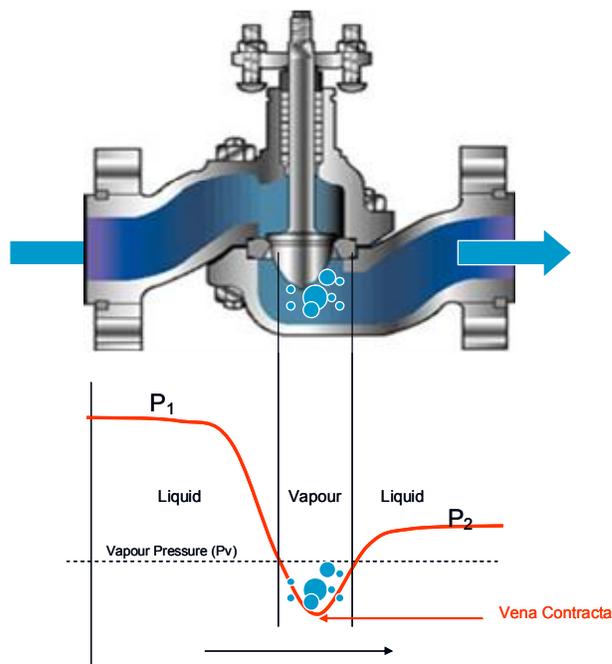
- **Kurva aliran dari karakteristik Kavitasi (Cavitation)**

Sebaliknya bila *pressure recovery* (P_2) yang terjadi pada vena contracta berada di atas tekanan uap (P_v) dari liquid, maka gelembung akan collapse yang akan mengeluarkan energi yang besar sekali dan menghasilkan noise. Proses semacam ini dinamakan kavitasi, dan ditunjukkan pada Gambar 2.4

Kavitasi dapat mengakibatkan kerusakan pada material oleh karena adanya gelembung-gelembung yang collapse.



Gambar 4.55. Kerusakan yang diakibatkan Cavitation



Gambar 4.56. Kurva aliran dari karakteristik Kavitasi

BAB V

SISTEM KONTROL PROSES

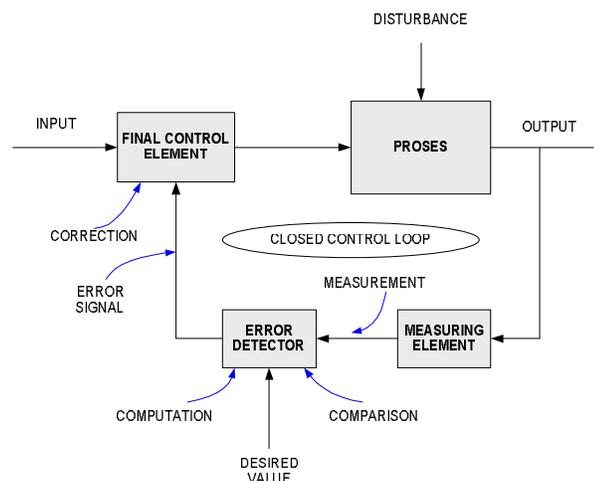
5.1. Pendahuluan

Suatu industri kilang minyak (*refinery*) atau petrokimia (*petrochemical*) merupakan suatu susunan beberapa unit peralatan proses (reaktor, penukar panas, pompa, kolom destilasi, absorber, evaporator, tanki, dan sebagainya), yang saling terpadu dan bekerja secara sistematis. Secara keseluruhan, suatu pabrik memiliki tujuan utama mengubah beberapa material mentah menjadi produk tertentu dengan menggunakan sumber-sumber energi tertentu dengan cara yang paling ekonomis.

Di dalam pengoperasiannya, suatu industri proses harus memenuhi beberapa persyaratan berdasarkan pertimbangan berbagai macam kondisi dalam dinamika pengaruh eksternal (*disturbances*). Persyaratan-persyaratan tersebut diantaranya adalah masalah keamanan (*safety*), spesifikasi produksi, pengaruh terhadap lingkungan, batasan operasi (*operational constraints*), serta masalah ekonomi.

Untuk menjamin semua persyaratan tersebut dapat dipenuhi, maka industri proses perlu memiliki suatu sistem yang dapat memonitor dan mengendalikan semua proses yang ada di dalamnya supaya tujuannya dapat terpenuhi. Hal ini dapat dilakukan melalui suatu susunan peralatan instrumen (alat pengukur, kontroler, komputer, dan *control valve*) serta campur tangan manusia (*operator*) yang bersama-sama membentuk sesuatu yang dinamakan sistem kontrol.

Pada semua proses umumnya operator tidak hanya ingin mengetahui suatu harga besaran fisik, tetapi juga selalu ingin mengaturnya pada suatu harga tertentu agar suatu proses bekerja secara optimum. Blok diagram suatu system instrumentasi dan pengontrolan besaran yang diukur yang terhubung secara lingkaran tertutup (*closes loop*) dapat digambarkan seperti di bawah ini.



Gambar 5.1. Sistem Instrumentasi dan Pengontrolan

Sistem instrumentasi dengan pengontrolan lingkaran tertutup adalah system yang sinyal keluarannya berpengaruh secara langsung pada aksi kontrolnya. Sinyal penggerak yang merupakan selisih antar sinyal masukan dan sinyal umpan balik diberikan ke controller untuk memperkecil kesalahan dan membuat agar keluaran system mendekati harga yang diinginkan.

Tujuan diadakannya suatu sistem kontrol adalah sebagai berikut :

- Menekan pengaruh dari gangguan eksternal (*external disturbances*)
- Menjamin stabilitas proses
- Mengoptimumkan performansi proses.

5.2. Aspek-Aspek Desain Sistem Kontrol Proses

Variabel-variabel yang berhubungan dengan suatu proses (*flow, pressure, level fluid dan temperature*) terbagi didalam dua kelompok, yaitu :

- Variabel Input, yaitu efek dari lingkungan (*surrounding*) yang dapat mempengaruhi dinamika proses.
- Variabel Output, yaitu efek dari proses yang dapat mempengaruhi lingkungan.

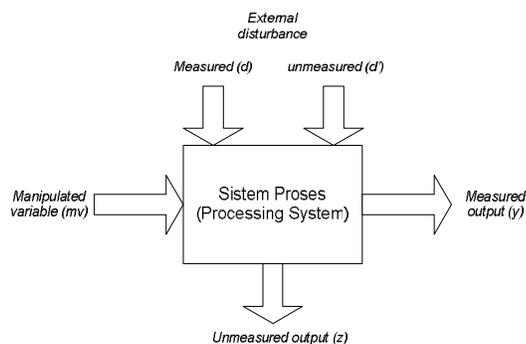
Variabel input dapat juga dikelompokkan pada kategori-kategori berikut ini :

- Manipulated Variables (MV)*, yaitu variable input yang nilainya dapat diatur oleh operator manusia atau mekanisme kontrol.
- Disturbances*, yaitu variable input yang nilainya tidak dapat diatur oleh operator atau mekanisme kontrol

Sedangkan variabel output dapat juga diklasifikasikan sebagai berikut:

- Measured Output Variables*, jika nilainya dapat langsung diketahui melalui mengukurnya.
- Unmeasured Output Variables*, jika nilainya tidak dapat diukur secara langsung.

Dalam kontrol proses, variabel output disebut juga variabel proses. Berikut ini diagram yang menggambarkan berbagai macam variabel yang mempengaruhi sistem proses.

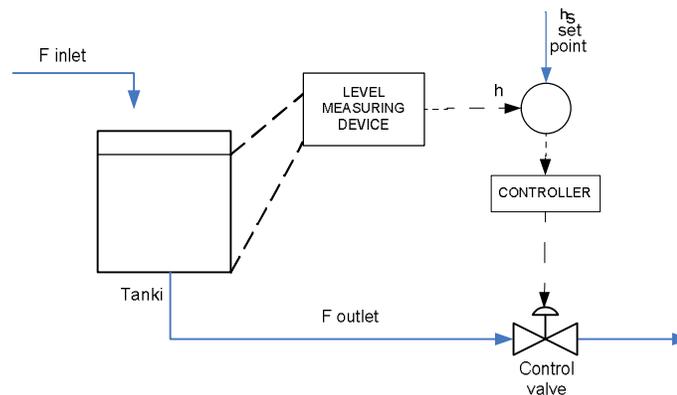


Gambar 5.2. Variabel Input dan Output pada Sistem Proses

5.3. Elemen-Elemen Sistem Kontrol Proses

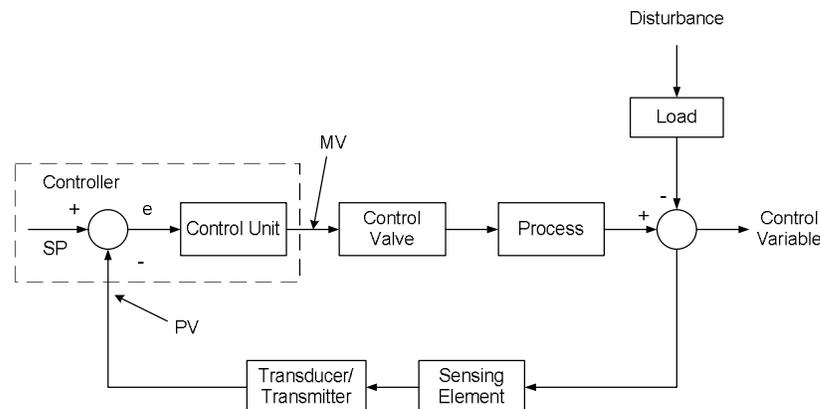
Elemen-elemen dalam suatu sistem kontrol proses dapat dibedakan menjadi : proses, sensor (*sensing element*), *transducers*, *transmitter*, *transmission lines*, kontroler, *final control element* (*control valve*). Seluruh elemen ini bersama-sama membentuk suatu sistem kontrol, seperti diperlihatkan pada contoh sistem kontrol proses pada Gambar 5.3.

Sistem ini terdiri dari sebuah tangki, sebuah *level measuring device*, sebuah kontroler, dan sebuah *control valve*. Aliran *liquid* dialirkan melalui permukaan atas tangki, kemudian dikeluarkan dari bawah tangki yang diatur oleh *control valve*.



Gambar 5.3. Contoh sederhana dari sebuah sistem kontrol proses.

Tangki beserta *liquid* di dalamnya merupakan sebuah **proses**. *Level measuring device* sebagai sebuah **sensor** ketinggian sekaligus **transducer**, akan mengukur ketinggian cairan tersebut serta mengubahnya menjadi besaran elektrik atau pneumatik. Jika level cairan dalam tangki melebihi tinggi yang diinginkan (*set point*) maka **controller** akan memutuskan untuk memperbesar aliran outlet. Berdasarkan perintah controller, **final control element** (*control valve*) akan membuka (*opening*) untuk memperbesar aliran. Secara blok diagram system control proses tersebut di atas dapat dilihat pada gambar 5.4.



Gambar 5.4. Blok Diagram Sistem Kontrol Proses



1. Proses

Proses adalah peralatan (*equipment*) bersama-sama dengan reaksi fisis ataupun kimia yang terjadi di dalamnya.

2. Sensor (Sensing Element)

Instrumen-instrumen pengukur (*sensor*) adalah instrumen-instrumen yang digunakan untuk pengukuran (*measurement*). Variabel-variabel yang diukur adalah *Process Variables (PV)*. Instrumen ini juga digunakan untuk memperoleh informasi tentang apa yang sedang terjadi di dalam suatu proses.

Dalam suatu sistem kontrol dapat dijumpai berbagai macam sensor yang berbeda dalam fungsinya. Sensor-sensor yang digunakan akan berbeda tergantung dari *process variable* yang akan diukur. Jenis-jenis sensor tersebut adalah sebagai berikut (seperti yang sudah dijelaskan pada BAB II) : Pressure Sensor, Temperature Sensor, Flow Sensor, Liquid Level Sensor dan Composition Sensor.

3. Transducers / Transmitter

Beberapa sinyal pengukuran tidak dapat digunakan untuk aktuasi pengontrolan sebelum dikonversi ke dalam besaran-besaran fisis tertentu (sinyal elektrik atau sinyal pneumatik). Setelah dikonversi ke dalam sinyal elektrik atau pneumatik, sinyal hasil pengukuran tersebut dapat ditransmisikan dengan mudah dan juga dapat dimengerti oleh controller.

Konversi ini dilakukan oleh suatu elemen yang disebut *transducers / transmitter*. Sebagai contoh, *strain gauges* dapat mengubah sinyal *pressure* menjadi sinyal elektrik.

4. Transmission Lines

Saluran transmisi (*transmission lines*) membawa sinyal hasil pengukuran oleh sensor dan telah diubah oleh *transducer/transmitter* ke controller atau dari controller ke *final control element*.

Saluran transmisi dapat berupa sinyal pneumatik (udara yang terkompresi). Namun, seiring dengan berkembangnya controller elektronik analog dan khususnya controller digital, saat ini kebanyakan menggunakan sinyal elektrik sebagai saluran transmisinya.

Sesuai dengan standard *ISA (Instrument Society of America)*, besarnya sinyal transmisi tersebut adalah :

- Sinyal Pneumatik : 3 – 15 psig (0.2 – 1 kg/cm²)
- Sinyal Elektrik : 4 – 20 mA.

psig = pounds per square inches (gauge)

Tujuan dari standarisasi tersebut adalah untuk kemudahan pengguna dalam memilih instrumen, juga kemudahan dalam perancangan, kalibrasi, dan pemeliharaan.

5. Controller

Controller memperoleh informasi dari *measuring device* yaitu sinyal *Process Variable (PV)*, membandingkan dengan *Set Point (SP)*, menghitung banyaknya koreksi yang diperlukan sesuai dengan algoritmanya (P, PI, dan PID), dan kemudian memutuskan atau mengeluarkan sinyal koreksi (*Manipulated Variable / MV*) untuk ditransmisikan ke *Control Valve*.

Controller dapat berupa *controller* mekanik (*pneumatic*), *controller* elektronik atau *controller* digital yang terkomputerisasi dengan kemampuan dapat melaksanakan tugas-tugas kontrol yang cukup rumit.

6. Final Control Element (Control Valve)

Salah satu elemen pengendali akhir yang sering dijumpai adalah *control valve*. Elemen ini mengimplementasikan keputusan yang diambil oleh kontroler. Misalnya, apabila kontroler "memutuskan" untuk menaikkan laju aliran (*flow rate*) suatu fluida, maka *control valve* akan membuka atau menutup untuk mengimplementasikannya.

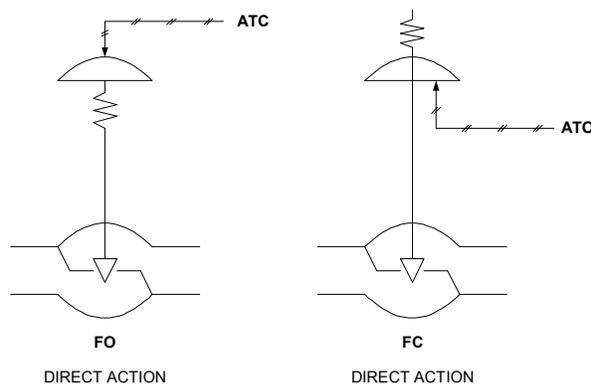
Control valve dapat dibedakan sesuai dengan aksi dari aktuator, yaitu:

- **Direct Action / Fail Open (FO) / Air-To-Close (ATC)**

Control Valve yang akan terbuka (*open*) bilamana *air supply (driving power)* gagal (*fail*). Atau dengan kata lain *control valve* akan menutup (*closed*) apabila sinyal yang masuk di aktuator naik. Sebaliknya *control valve* akan membuka (*open*) apabila sinyal yang masuk di aktuator turun.

- **Reverse Action / Fail Close (FC) / Air-To-Open (ATO)**

Control Valve yang akan tertutup (*closed*) bilamana *air supply (driving power)* gagal (*fail*). Atau dengan kata lain *control valve* akan membuka (*open*) apabila sinyal yang masuk di aktuator naik. Sebaliknya *control valve* akan menutup (*closed*) apabila sinyal yang masuk di aktuator turun.



Gambar 5.5. Control Valve dengan Action Aktuator

Selain *control valve*, elemen pengendali akhir yang juga sering dijumpai pada sistem pengendalian proses adalah *relay switches*, yang berfungsi untuk implementasi kontrol *on-off*.



5.4. Algoritma Pengontrolan dari Controller

5.4.1. ON-OFF Control

Sistem ini merupakan *loop control* yang paling sederhana. Dalam aksi kontrol ini, *final control element* hanya mempunyai dua keadaan operasi. Jika sinyal kesalahan positif, *controller* mengirim sinyal hingga *final control element* (*control valve*) bergerak ke salah satu posisi, dan jika sinyal kesalahan negatif akan bergerak ke posisi yang lain.

Secara matematis sistem ini dapat dituliskan sebagai berikut :

$$m(t) = M, \text{ untuk } e(t) > 0$$

$$m(t) = -M, \text{ untuk } e(t) < 0$$

Sistem dengan algoritma ON-OFF ini akan memberikan keluaran yang berosilasi sebelum mencapai harga *set point*-nya.

5.4.2. Proportional Control (P Control)

Dalam aksi pengontrolan proporsional, alat pengoreksi akhir memiliki suatu daerah posisi yang kontinu. Posisi tepatnya sebanding dengan besarnya kesalahan, dengan kata lain, output dari *controller* sebanding dengan inputnya.

Kontroler ini memiliki output untuk aktuasi (*actuating output*) yang proporsional terhadap error:

$$m(t) = K_c \varepsilon(t) + m_s$$

dengan:

$$m(t) = \text{sinyal aktuasi}$$

$$\varepsilon(t) = \text{error}$$

$$K_c = \text{proportional gain dari kontroler}$$

$$m_s = \text{sinyal bias (sinyal aktuasi ketika error } \varepsilon(t) = 0)$$

Kontroler *proportional* dicirikan oleh *proportional gain* K_c atau dengan nilai *proportional band* PB , dengan $PB = \frac{100}{K_c}$.

$$K_c = \text{Perubahan Output} / \text{Perubahan Input}$$

Dengan demikian, *Proportional Band* adalah perbandingan antara perubahan input terhadap perubahan output.

Dari persamaan di atas dapat ditentukan fungsi transfer suatu kontroler P

$$m(t) - m_s = K_c \varepsilon(t)$$

misalkan $m(t) - m_s = m'(t)$, maka

$$m'(t) = K_c \varepsilon(t).$$

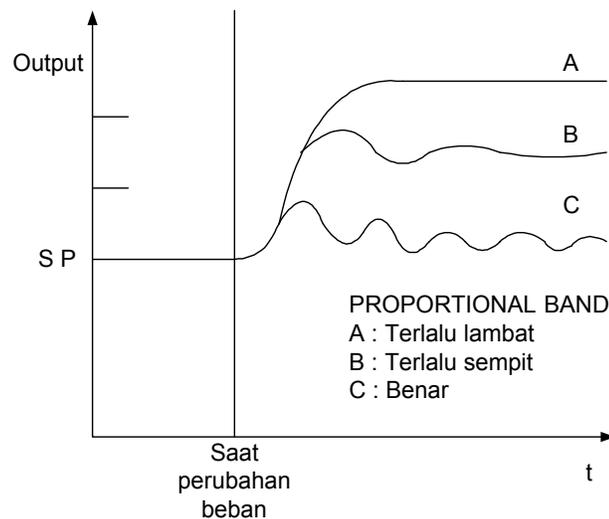
Transformasi Laplace dari persamaan di atas menyatakan fungsi transfer kontroler Proporsional

$$\frac{M'(s)}{E(s)} = G_c(s) = K_c$$

Efek dari kontrol proporsional adalah menghilangkan osilasi yang timbul di sekitar *set point* bila *proportional band*-nya diset (*tuning*) pada nilai atau keadaan yang tepat.

Efek lain dari kontrol ini adalah adanya offset pada hasil pengontrolannya. Offset ini terjadi akibat harga *setpoint* tidak dapat dicapai sesudah suatu perubahan beban terjadi. Besarnya offset ini tergantung pada harga *proportional band*-nya. Semakin besar harga *proportional band*-nya maka akan semakin besar offsetnya, sebaliknya semakin kecil harga *proportional band*-nya maka semakin besar kemungkinan osilasi terjadi (peredaman osilasi kecil).

Respon untuk jenis proporsional controller terhadap perubahan beban dapat dilihat pada Gambar 5.6.



Gambar 5.6. Respon *Proportional Controller* terhadap Perubahan Beban

Di dalam prakteknya, *proportional control* akan berfungsi baik untuk sistem yang proses perubahan bebannya secara lambat dan variasi *set point*-nya kecil, karena dengan demikian *proportional band*-nya dapat diambil cukup kecil.

5.4.3. Proportional Integral Control (PI Control)

Dalam aksi pengontrolan proporsional plus integral, posisi alat pengoreksi akhir (*control valve*) ditentukan oleh dua hal :

- Besarnya sinyal kesalahan, ini adalah bagian proporsional
- Integral waktu dari sinyal kesalahan, artinya besarnya kesalahan dikalikan dengan waktu dimana kesalahan tersebut terjadi, ini adalah bagian integral.

Kontroler tipe ini juga dikenal sebagai kontroler *proportional-plus-reset*. Hubungan antara sinyal aktuasi dengan error adalah sebagai berikut:

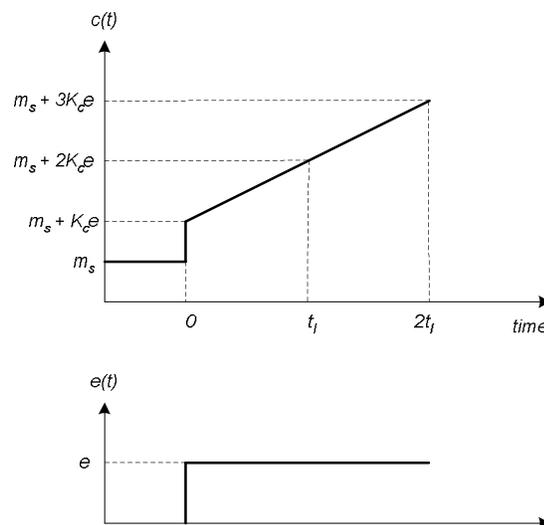
$$m(t) = K_c \varepsilon(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \int_0^t \varepsilon(t) dt + m_s$$

dengan τ_I adalah konstanta *integral time* atau *reset time* dalam satuan menit. Karakteristik penting pada controller jenis ini adalah konstanta waktu integral. Konstanta ini merupakan parameter yang dapat diatur dan kadang-kadang mengacu sebagai *minutes per repeat*. Tetapi didalam industri yang digunakan sebagai acuan adalah kebalikan dari konstanta waktu yang dikenal sebagai *reset rate*.

Untuk mengerti cara kerja kontroler PI, misalkan terdapat perubahan error sebagai fungsi *step* dengan besar ε . Pada awalnya, error = 0, karena itu output dari kontroler adalah $K_c \varepsilon$ sebagai akibat kontribusi dari bagian integral adalah nol. Setelah periode τ_I , kontribusi bagian integral adalah:

$$\frac{K_c}{\tau_I} \int_0^{t_I} \varepsilon(t) dt = \frac{K_c}{\tau_I} \varepsilon \tau_I = K_c \varepsilon$$

ini berarti aksi kontrol integral telah "mengulang" respon dari aksi kontrol proporsional. Pengulangan ini terjadi setiap periode τ_I menit seperti yang ditunjukkan oleh gambar berikut ini. Inilah yang menyebabkan τ_I dinamakan *reset time*.



Gambar 5.7. Respon Kontroler PI terhadap Perubahan Error berupa Step

Aksi kontrol integral menyebabkan output $c(t)$ berubah selama error tidak sama dengan nol. Oleh karena sifat inilah, kontroler yang demikian dapat menghilangkan error bahkan pada kondisi error yang kecil.

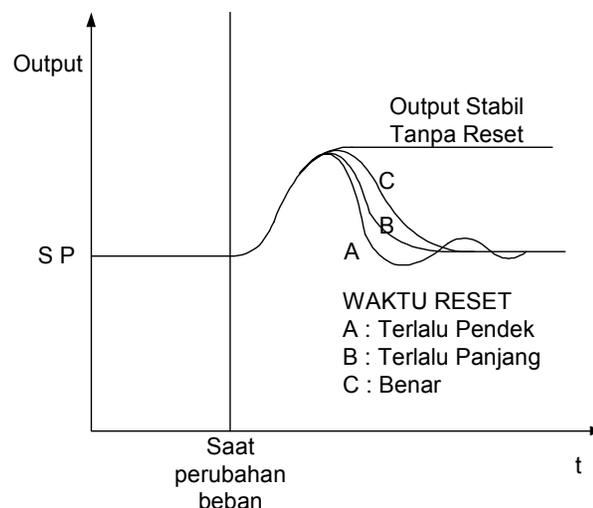
Fungsi transfer untuk kontroler PI adalah

$$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_I s} \right).$$

Efek dari penambahan Integral pada controller ini akan menghilangkan offset yang terjadi akibat *proportional control*, karena adanya integral terhadap waktu. Jadi offset akan terkoreksi dengan berjalannya waktu, artinya untuk menghasilkan respon yang tidak mempunyai offset maka memerlukan selang waktu tertentu.

Efek lain dari penambahan integral adalah lebih lambatnya respon sistem, selain itu pada sistem ini akan terjadi osilasi pada saat bagian integral menghilangkan offset, serta timbulnya *overshoot* apabila ada perubahan beban.

Respon untuk jenis *proportional + integral controller* terhadap perubahan beban dapat dilihat pada Gambar 5.8.



Gambar 5.8. Respon *PI Controller* terhadap Perubahan Beban

Jenis *PI controller* ini dalam aplikasinya pada industri dapat menangani hampir setiap situasi kontrol proses. Perubahan beban yang besar dan variasi yang besar pada *set point* dapat dikontrol dengan baik tanpa osilasi yang berkepanjangan, tanpa offset permanen dan cepat ke keadaan seharusnya setelah gangguan terjadi.

5.4.4. Proportional Integral Derivative Control (PID Control)

Dua karakteristik proses yang sangat sulit pengontrolannya, dimana control PI tidak lagi memadai, yaitu: proses dengan beban berubah dengan sangat cepat dan proses yang memiliki kelambatan yang besar antara tindakan korektif dan hasil yang muncul dari tindakan tersebut.

Dalam aksi pengontrolan *proportional plus integral plus derivative (PID)*, posisi alat pengoreksi akhir (*control valve*) ditentukan oleh dua hal:

- Besarnya sinyal kesalahan, ini adalah bagian proporsional



- Integral waktu dari sinyal kesalahan, artinya besarnya kesalahan dikalikan dengan waktu dimana kesalahan tersebut terjadi, ini adalah bagian integral.
- Laju perubahan kesalahan terhadap waktu. Perubahan kesalahan yang cepat menyebabkan suatu aksi korektif yang lebih besar dari perubahan kesalahan. Ini adalah bagian *derivative*.

Kontroler jenis ini dikenal juga sebagai kontroler *proportional-plus-reset-plus-rate*.

Output dari kontroler ini dinyatakan sebagai:

$$m(t) = K_c \varepsilon(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \int_0^t \varepsilon(t) dt + K_c \tau_D \frac{d\varepsilon}{dt} + m_s$$

dengan τ_D adalah konstanta *derivative time* dalam satuan menit.

Karakteristik tambahan dengan adanya *derivative control* dikenal sebagai *rate time* (konstanta waktu derivative).

Dengan adanya bagian derivatif, $\frac{d\varepsilon}{dt}$, kontroler PID mengantisipasi apa yang akan terjadi pada error pada masa sesaat yang akan datang dan kemudian melakukan aksi kontrol yang sebanding dengan kecepatan perubahan error saat ini. Berdasarkan sifat ini, aksi kontrol derivatif kadang-kadang mengacu sebagai *anticipatory control*.

Walaupun demikian, aksi kontrol derivatif memiliki beberapa kelemahan seperti berikut ini :

1. Untuk respon dengan error konstan dan tidak nol, kontroler ini tidak memberikan aksi kontrol karena $\frac{d\varepsilon}{dt} = 0$.
2. Untuk respon yang bergejolak, dengan error yang hampir nol, kontroler ini dapat memperoleh nilai derivatif yang besar, yang menghasilkan aksi kontrol yang besar, meskipun seharusnya tidak perlu.

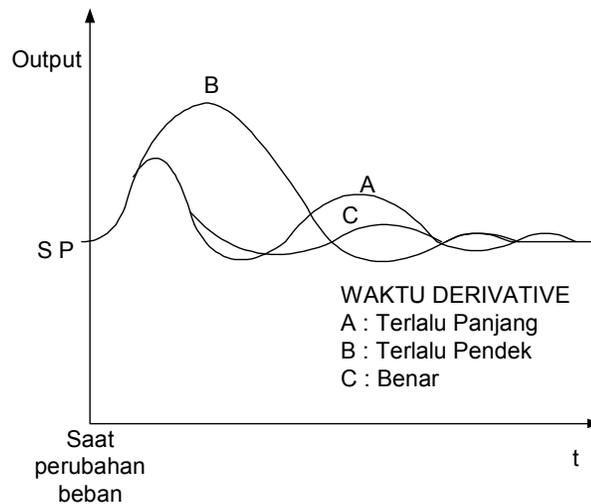
Fungsi transfer untuk kontroler PID adalah sebagai berikut:

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

Efek dari PID controller ini adalah bila pada proses kesalahannya sangat besar, maka controller PI akan membutuhkan waktu yang panjang untuk mencapai *set point*-nya, tetapi untuk controller PID akan mempercepat proses pencapaian *set point* tersebut.

Rate time akan berpengaruh terhadap respon *controller*, *rate time* yang terlalu besar mempercepat laju pencapaian *set point* tetapi akan menyebabkan terjadinya osilasi di sekitar *set point*.

Respon *proportional + integral + derivative (PID) controller* terhadap perubahan beban dapat dilihat pada Gambar 5.9.



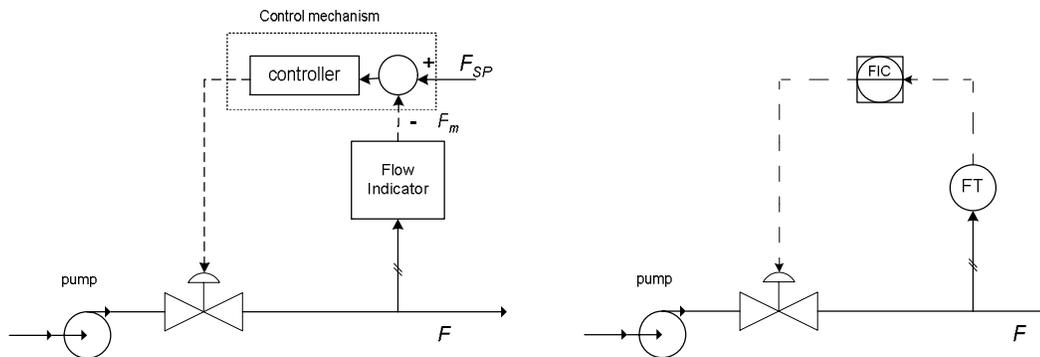
Gambar 5.9. Respon *PID Controller* terhadap Perubahan Beban.

5.5. Klasifikasi Aplikasi Sistem Kontrol Proses

Berdasarkan variabel yang dikontrol, controller dapat dikelompokkan menjadi beberapa tipe, yaitu : *Flow Controller*, *Pressure Controller*, *Liquid-Level Controller* dan *Temperature Controller*.

5.5.1. Flow Control

Kontroler ini mengendalikan kecepatan aliran (*flow rate*) pada nilai *setpoint*-nya. Gambar berikut ini memperlihatkan contoh konfigurasi *flow control*.



Gambar 5.10. Sistem Pengendalian *Flow*

Penjelasan gambar:

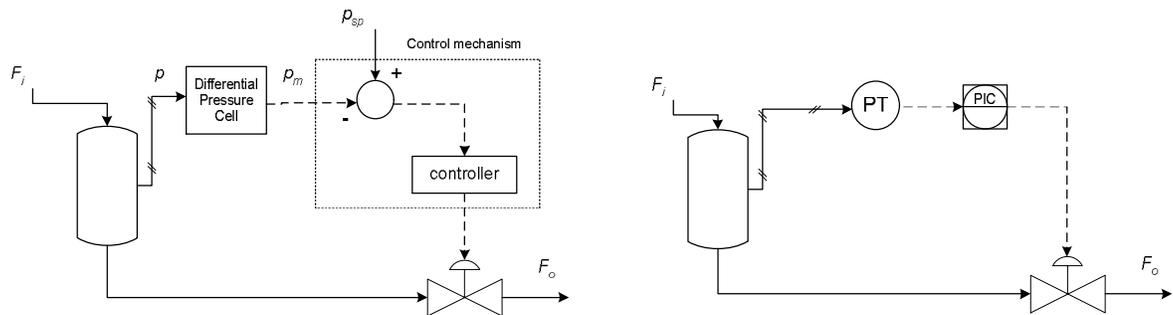
- *Flow Indicator* mengukur flow rate aliran F .
- Nilai F akan dibandingkan dengan *set point* F_{SP} , yaitu kecepatan aliran yang diinginkan

- Controller akan memutuskan/mengoreksi *error* dengan mengirimkan sinyal ke elemen pengendali akhir
- Berdasarkan sinyal ini *control valve* akan membuka atau menutup sampai keadaan mantap tercapai
- Mekanisme kontrol yang tepat adalah apabila F naik, maka *control valve* akan menutup, sebaliknya apabila F turun, maka *control valve* akan membuka.

Mekanisme kontrol (*control mechanism*) ditunjukkan oleh kotak yang bergaris putus-putus. Pada bagian inilah terjadi proses pengendalian.

5.5.2. Pressure Control

Kontroler ini mengendalikan tekanan (*pressure*) pada nilai *setpoint*-nya. Gambar berikut ini memperlihatkan contoh dari mekanisme *pressure control*.



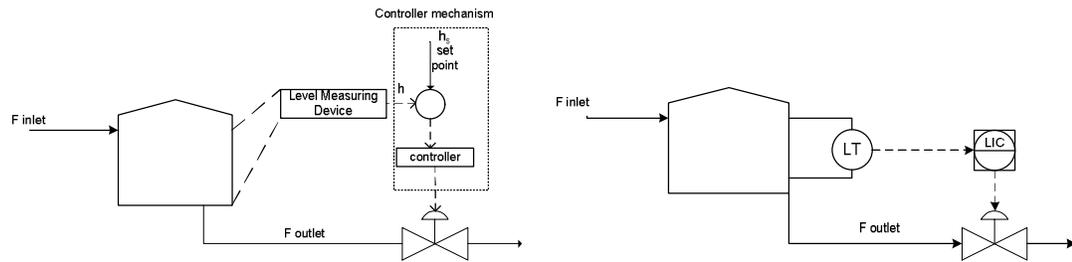
Gambar 5.11. Sistem Pengendalian Tekanan

Penjelasan gambar:

- *Pressure Indicator* berupa *Differential Pressure Cell* mengukur tekanan P di dalam tangki.
- Nilai P akan dibandingkan dengan *set point* P_{SP} , yaitu tekanan yang diinginkan
- Controller akan memutuskan/mengoreksi *error* dengan mengirimkan sinyal ke elemen pengendali akhir
- Berdasarkan sinyal ini *control valve* akan membuka atau menutup sampai keadaan mantap tercapai
- Mekanisme kontrol yang tepat adalah apabila P naik (turun), maka *control valve* akan membuka (menutup).

5.5.3. Liquid-Level Control

Kontroler ini mengendalikan ketinggian cairan (*liquid level*) pada nilai *setpoint*-nya. Gambar berikut ini memperlihatkan contoh dari mekanisme *liquid-level control*.



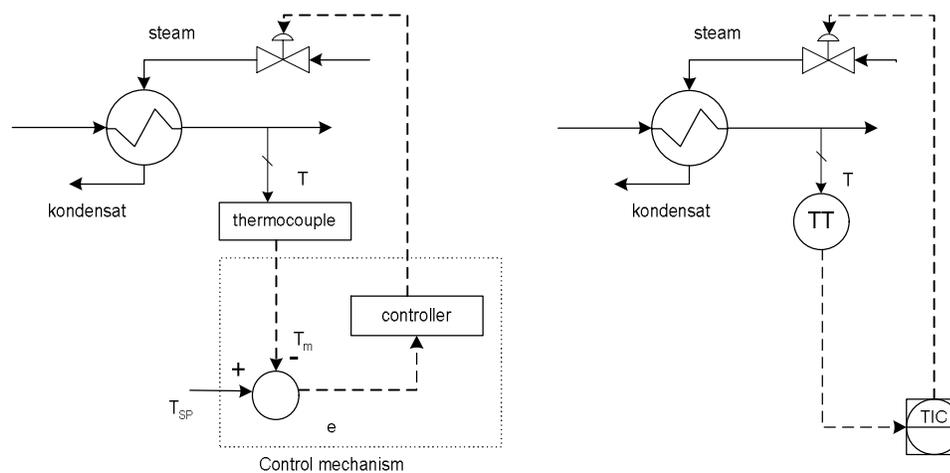
Gambar 5.12. Sistem Pengendalian Level

Penjelasan gambar:

- *Level Indicator* mengukur ketinggian h di dalam tangki.
- Nilai h akan dibandingkan dengan *set point* h_{SP} , yaitu ketinggian yang diinginkan.
- Controller akan memutuskan/mengoreksi *error* dengan mengirimkan sinyal ke elemen pengendali akhir
- Berdasarkan sinyal ini *control valve* akan membuka atau menutup sampai keadaan mantap tercapai
- Mekanisme kontrol yang tepat adalah apabila h naik (turun), maka *control valve* akan membuka (menutup).

5.5.4. Temperature Control

Kontroler ini mengendalikan temperatur pada nilai *setpoint*-nya. Gambar berikut ini memperlihatkan contoh dari mekanisme *temperature control*.



Gambar 5.13. Sistem Pengendalian Temperatur



Penjelasan gambar:

- *Temperature Indicator*, berupa termokopel mengukur temperature T aliran.
- Nilai T akan dibandingkan dengan *set point* T_{SP} , yaitu temperature yang diinginkan
- Controler akan memutuskan/mengoreksi *error* dengan mengirimkan sinyal ke elemen pengendali akhir
- Berdasarkan sinyal ini *control valve* akan membuka atau menutup sampai keadaan mantap tercapai
- Mekanisme kontrol yang tepat adalah apabila T naik (turun), maka *control valve* akan menutup (membuka).

5.6. Klasifikasi Loop Control Process

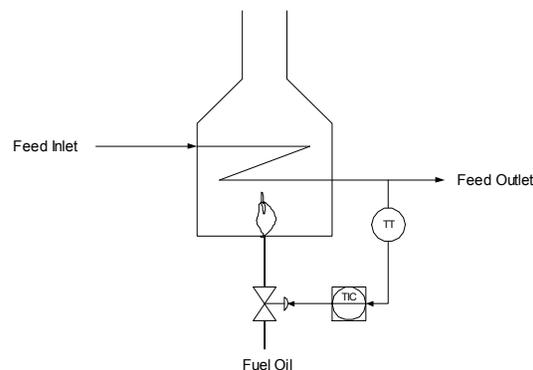
5.6.1. Simple Control Loop (Basic Control Loop)

Terdapat dua macam konfigurasi *looping* dalam sistem kontrol proses. Konfigurasi ini dibedakan berdasarkan bagaimana aksi kontroler dalam mengontrol *process variable*. Kedua macam konfigurasi tersebut adalah sistem kontrol *feedback* dan sistem kontrol *feed forward*.

A. Closed Loop Control – Feedback

Feedback control adalah suatu sistem pengontrolan dimana *control action* tergantung pada output proses. Tipe sistem kontrol ini mengukur *process variable* pada output proses. Setiap terjadi perubahan pengukuran pada outlet proses akibat adanya efek dari *disturbances (load)*, maka sistem kontrol *feedback* bereaksi memberikan *corrective action* untuk menghilangkan kesalahan (*error*).

Jadi sistem *control feedback* akan bereaksi setelah efek dari *disturbances* dirasakan pada output proses (*act post facto*). Gambar 5.14. merupakan contoh dari tipe sistem kontrol *feedback* dalam aplikasinya yaitu *furnace* pada industri proses.



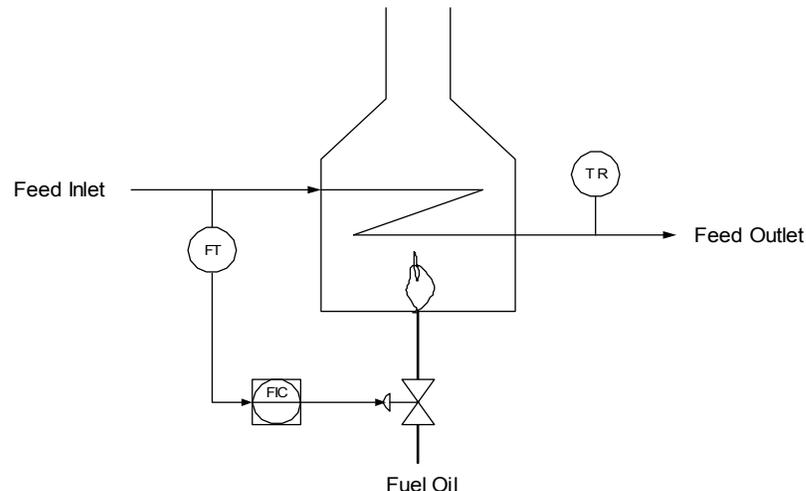
Gambar 5.14. Aplikasi *Feedback Control* dalam Industri Proses

B. Closed Loop Control – Feedforward

Tidak seperti konfigurasi *feedback*, kontrol *feedforward* tidak menunggu efek *disturbances* dirasakan oleh proses, sebaliknya akan beraksi sebelum *disturbances* mempengaruhi sistem untuk mengantisipasi efek yang akan disebabkan olehnya.

Pada *feedforward* control seperti pada gambar 4.15. setiap terjadi perubahan pada *feed inlet*, maka akan menggerakkan *controller* untuk mengatur *fuel oil* sehingga aliran *feed* akan sebanding dengan aliran *fuel oil* (menciptakan *energy balance*). Dengan demikian efek yang disebabkan oleh perubahan feed tidak dirasakan pada output proses (temperatur outlet).

Kelemahan *feedforward* control pada aplikasi di atas yaitu bila terjadi gangguan pada *fuel oil*, maka *controller* tidak dapat merasakan perubahan itu sehingga terjadi kesalahan pada output proses (temperatur outlet).



Gambar 5.15. Aplikasi Feedforward Control dalam Industri Proses

5.6.2. Complicated Control Loop (Enhanced Regulatory Control)

Di dalam industri proses, banyak kebutuhan proses yang tidak dapat diselesaikan dengan loop sederhana (*simple loop*) yang hanya mengandalkan sebuah *feedback control* atau *feedforward control*.

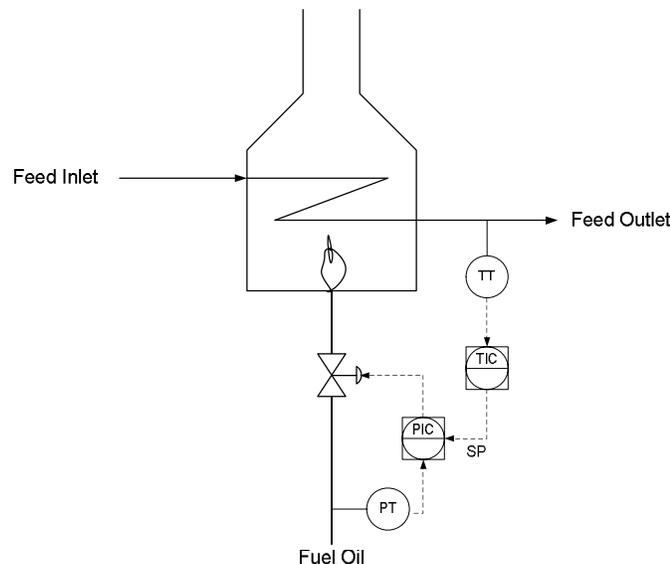
Beberapa jenis proses yang memiliki *time constant* yang sangat besar. Walaupun unit *derivative* sudah dipasang di *controller*, karena lambannya proses sehingga reaksi proses tetap saja lambat. Dari segi operasi proses kelambatan ini sangat merugikan. Untuk mengatasi masalah ini, maka dipergunakan dua atau lebih elemen pengukuran dalam satu *control loop*, yang dikenal sebagai *complicated control loop*, seperti:

A. Cascade Control

Gambar 5.16. *closed loop feedback control* mengilustrasikan pengendalian temperatur *feed outlet* pada sebuah *furnace*. *Load* pada *loop* digambarkan sebagai perubahan aliran *feed* pada inlet. Bilamana *feed* mendadak bertambah, maka energi panas *fuel oil* yang bekerja pada *furnace* tidak akan mencukupi. Sebagai akibatnya, temperatur *feed outlet* akan turun dan *controller* baru membaca error, kemudian memakainya sebagai dasar perhitungan untuk menambah aliran *fuel oil*.

Namun sistem ini tidak mempertimbangkan *load* atau gangguan lain pada sistem, yaitu terjadi penurunan tekanan *fuel oil*. Pada sistem ini pengendalian temperatur tidak akan segera melihat perubahan tekanan *fuel oil* sebelum temperatur *feed outlet* benar-benar turun.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, maka sistem control disempurnakan dengan menambah *Pressure Controller* diantara *Temperature Controller* dan *Control Valve* seperti pada gambar 3.11.



Gambar 5.16. Aplikasi *Cascade Control* dalam Industri Proses

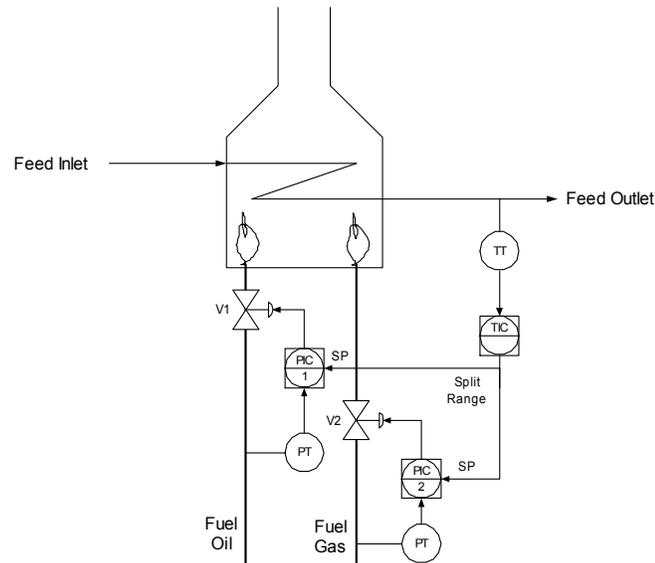
Pada gambar diatas *manipulated variable* dari *temperature controller* TIC (yang dinamakan *primary* atau *master*) menjadi *setpoint* bagi *pressure controller* (yang dinamakan *secondary* atau *slave*).

Penerapan pengendalian *cascade* dapat merugikan apabila elemen proses di *primary loop* lebih cepat dari elemen proses pada *secondary loop*, karena sistem akan cenderung beresilasi akibat timbulnya interaksi antara *primary loop* dan *secondary loop*. Jadi sistem pengendalian *cascade* hanya dapat diterapkan pada proses dengan elemen primer yang jauh lebih lambat dari elemen *secondary*-nya.

B. Split Range Control

Tidak seperti *cascade control*, konfigurasi *split-range control* memiliki hanya satu pengukuran dan lebih dari satu *manipulated variable*. Pengendalian terhadap satu *process variable* dilakukan dengan mengkoordinasikan beberapa *manipulated variables* yang semuanya memiliki efek yang sama terhadap *process variable*.

Gambar 5.17. di bawah mengilustrasikan aplikasi *split-range control* di industri proses. Konfigurasi ini dapat memberikan keamanan tambahan dan optimalitas operasional jika diperlukan.



Gambar 5.17. Aplikasi *Split Range Control* Dalam Industri Proses

Misalkan, suatu *feed* akan dipanaskan di dalam suatu *furnace* dengan menggunakan bahan bakar (*fuel*). Temperatur *feed* di outlet bejana dipertahankan tetap pada suhu tertentu. Bahan bakar yang tersedia ada dua jenis yaitu, *fuel oil* sebagai bahan bakar utama dan *fuel gas* digunakan sebagai *balance*. Kontroler temperatur *split-range* akan menjaga temperatur outlet dengan memanipulasi bukaan *valve* pada kedua bahan bakar. Dengan konfigurasi ini dapat diatur aksi kontrol sebagai berikut :

- Sebagaimana output controller TIC meningkat dari 0 – 50 %, maka *control valve* V_1 (untuk *fuel oil*) akan membuka secara kontinu hingga bukaan penuh, sedangkan *control valve* V_2 (untuk *fuel gas*) tetap tertutup.
- Apabila output kontroler TIC masih naik, dari 50 – 100%, maka *control valve* V_2 akan membuka secara kontinu sampai bukaan penuh, sedangkan *valve* V_1 masih tetap terbuka penuh. Dengan demikian *fuel gas* digunakan sebagai *balance* apabila *fuel oil* masih tidak cukup untuk menaikkan temperatur output.

Tabel berikut ini mengilustrasikan cara kerja kontroler *Split Range Control*

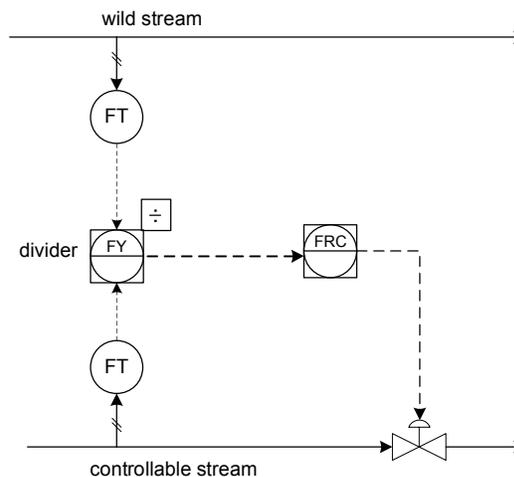
Output Controller TIC	Control Valve V ₁	Control Valve V ₂
0 – 50% (50 – 0%)	Membuka (menutup) secara kontinu hingga maksimum (minimum)	Tertutup
50 – 100% (100 – 50%)	Terbuka	Membuka (menutup) secara kontinu hingga maksimum (minimum)

C. Ratio Control

Ratio control adalah sistem pengendalian yang digunakan pada suatu proses yang membutuhkan komposisi campuran dua komponen atau lebih dengan suatu perbandingan tertentu.

Ratio control juga merupakan suatu tipe khusus dari *feedforward control* dengan dua *disturbances (loads)* diukur dan dijaga pada perbandingan yang konstan satu sama lain.

Biasanya konfigurasi kontrol ini digunakan untuk mengendalikan perbandingan laju aliran dari dua aliran (*streams*). Salah satu aliran (*stream*) yang laju alirannya tidak dikontrol biasanya mengacu sebagai *wild stream*. Berikut ini salah satu contoh sistem pengendalian proses yang menggunakan konfigurasi *ratio control*.



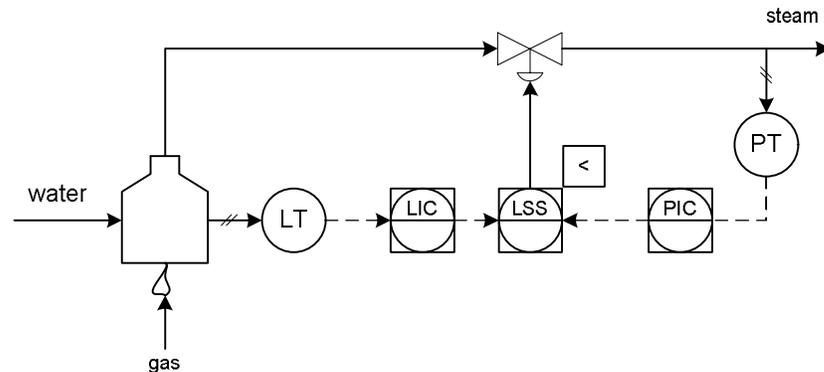
Gambar 5.18. Aplikasi *Ratio Control* dalam Industri Proses

Kedua laju aliran tersebut diukur dan melalui *divider* perbandingan keduanya dihitung. Hasil perbandingan ini kemudian dibandingkan dengan perbandingan yang diinginkan (*desired ratio* sebagai *setpoint*), dan error antara perbandingan yang terukur dengan *setpoint* menghasilkan sinyal aktuasi sebagai kontroler *ratio*.

D. Auto Selector Control

Sistem kontrol ini melibatkan satu *manipulated variable* (MV) dan beberapa *controlled outputs*. Karena hanya ada satu *manipulated variable*, maka hanya satu *controlled outputs* yang dapat dikendalikan, *auto selector control* akan mentransfer aksi kontrol dari satu *controlled output*

Gambar 5.19. mengilustrasikan suatu konfigurasi *auto selector control* sebagai suatu *low selector switch*.



Gambar 5.19. Aplikasi *Auto Selector Control* berupa *Low Selector Switch*

Sistem digunakan untuk memanaskan air yang mengalir ke dalam *boiler*. Suatu *control loop* tekanan diaplikasikan pada *steam* yang keluar dari *boiler*. Selain itu, kontroler level juga diaplikasikan pada *boiler*. *Low level selector* akan memindahkan aksi kontrol dari kontroler tekanan PIC ke kontroler level LIC apabila level *water* di *boiler* berada di bawah batas level minimalnya.

BAB VI

DCS YOKOGAWA CENTUM-XL KILANG UP-VI BALONGAN

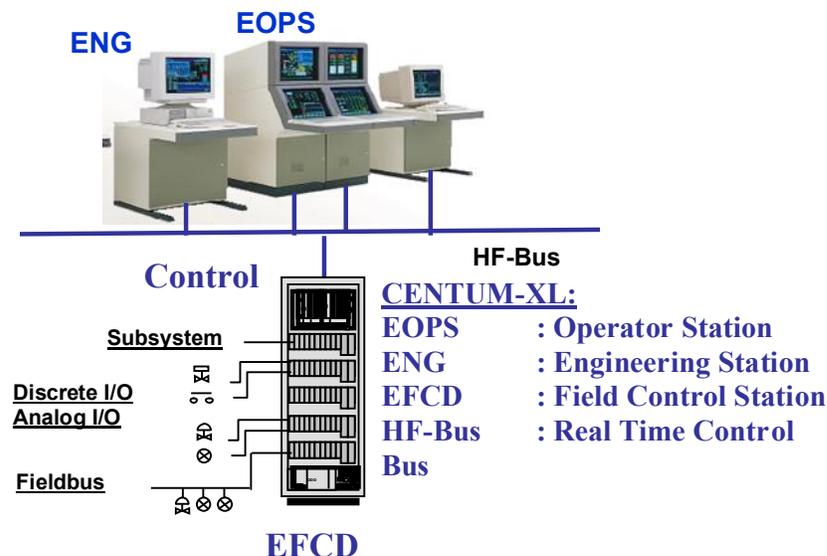
6.1. Sistem Konfigurasi Centum-XL

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, di dalam system DCS terdapat *control station* dan *operator station*. System *Centum-XL* terdiri dari beberapa *control station* yang menangani berbagai macam fungsi seperti *feedback control* dan *sequence control*. Selain itu, system ini memiliki beberapa *operator station* yang berfungsi sebagai pusat komputer *monitoring*.

Setiap *control station* berdiri sendiri dan terdistribusi di setiap unit proses. Biasanya untuk setiap unit proses disediakan sebuah *control station*. Ditempat inilah seluruh mekanisme pengendalian terjadi. Setiap *control station* ditempatkan di dalam suatu ruangan yang disebut *out station*.

Setiap *control station* menangani masalah pengendalian secara komputerisasi atau secara digital. Input yang diterima dari lapangan yang berupa sinyal elektrik, baik analog maupun digital. Walaupun demikian, setiap input analog akan diubah dahulu ke dalam bentuk digital agar dapat diproses oleh *control station*. Masing-masing fungsi kontrol dihubungkan oleh *data link*.

Operator station ditempatkan dan dipusatkan didalam suatu ruangan yang disebut *On Central Control Room (OCCR)*. Ditempat inilah terdapat antarmuka antara system pengendalian dengan manusia. Seluruh proses *monitoring* dan *manipulating* terjadi disini. Operator dapat memonitor serta memodifikasi fungsi control yang ada di *field* langsung pada layar monitor *operator station*.



Gambar 6.01. Basic Centum-XL Architecture

Secara umum, konfigurasi *Centum-XL* dapat dikelompokkan kedalam tiga bagian utama, yaitu :

- Man Machine Interface (EOPS)
- Process Control Function (EOPC)
- Data Communication Facilities (HF-Bus)

6.1.1. Man Machine Interface (EOPS)

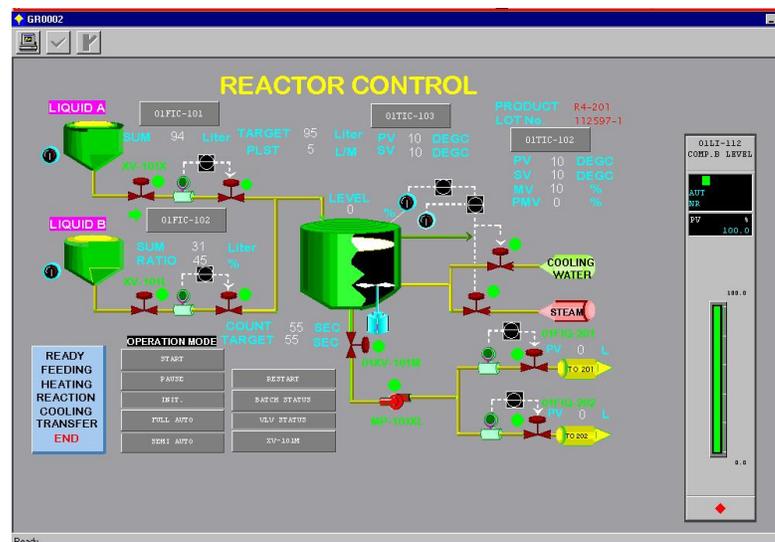
Man Machine Interface berfungsi sebagai antarmuka (*interface*) antara manusia dengan system *Centum-XL*, dan dikenal juga sebagai *operator station*. Konfigurasi dan *Man Machine Interface* dapat terdiri dari :

- *EOPS Operator Station*
- *EOPC Operator Console*
- *EPRT2 Serial Printer*
- *ECHU Color Hard Copy Unit*

A. EOPS (Enhanced Operator Station)

Merupakan *operator station* yang berfungsi sebagai pusat *monitoring* pengendalian yang ditempatkan didalam suatu ruang pusat kendali (*On Cental Control Room*). *EOPS Operator Station* merupakan implementasi dari MMI untuk *monitoring* fungsi pengendalian proses di lapangan.

EOPS Operation Station adalah suatu komputer yang memiliki tampilan seperti berikut ini.



Gambar 6.02. *Graphic Display Operator Station*



EOPS berfungsi sebagai layar minitor untuk menampilkan, mengoperasikan, serta me-record data-data yang diperoleh dari fungsi control di *field*. Melalui *station* ini operator dapat memonitor serta memanipulasi kerja kontroler di *field*, misalnya:

- a. Mengubah *set point*
- b. Mengubah *controller mode (auto/ manual/ cascade)*
- c. Memonitor *process variabel, trend* dari setiap variabel
- d. Melakukan *tuning*, dan lain-lain

Tampilan dalam layar CRT di *EOPS* dapat berupa grafik maupun teks yang dapat dioperasikan melalui *operator keyboard*. *EOPS* juga dilengkapi dengan fungsi *printer* yang dapat mencetak data-data yang di-record.

Spesifikasi umum sebuah *EOPS Operator Station* adalah sebagai berikut:

- a. *Central Processing Unit (CPU)* 32 bit MC68030 25 MHz
- b. *Main Memory* dengan kapasitas 8 Mbytes
- c. *Stage Unit* berupa :
 - *Harddisk 80/130 Mbytes*
 - *Floppy disk FDD 3.5 inch 1 Mbyte*
 - *Magnetic Catridge Tape unit 120 Mbyte* yang dapat dihubungkan. Fasilitas ini digunakan untuk menyimpan (*storing*) beberapa fungsi *EOPS Operator Station* dan data-data dalam jumlah banyak.
- d. *Clock, real time clock* dengan akurasi 8 detik/ hari
- e. Layar CRT 20 inch 750x 540 dots, 16 color full graphichigh-resolution dengan fasilitas *taouch screen* serta *switching time* 1 detik. Dengan fasilitas *toucscreen*, operator dapat menampilkan beberapa fungsi dan data dengan melakukan sentuhan pada layar monitor. Sensor dari fasilitas ini menggunakan system LED optik yang dipasang di sekeliling permukaan batas pinggiran display CRT. Layar CRT juga dilengkapi fasilitas penyetelan *brightness* serta *contrast*.
- f. *Operator Keyboard*

Operator Keyboard terbuat dari plat membran untuk menahan kotoran dan kelembaban. Beberapa fasilitas yang terdapat dalam perangkat ini :

- *Function Key*, yang terdiri dari 64 key yang terprogram dan dilengkapi dengan LED sebagai *annunciator* kepada operator. Penggunaannya sebagai *one-touch operation* untuk mengakses ke *screen* atau *faceplate*, sebagai inisialisasi program aplikasi.
- *Control Key*, yang digunakan untuk mengubah *loop status, set pont*, manipulasi *output feedback controller* atau mengubah *mode feedback controller*.
- *Panel select Key*, yang berfungsi untuk menampilkan beberapa tipe tampilan pada *screen*, seperti *graphic panel, trend recording panel, tuning panel, alarm summary panel* dan lain-lain.



- *Data Entry Key*, yang digunakan untuk memasukkan *tag number* dan *data setting*.
- *Keylock Mode Switch*, yang digunakan untuk membatasi akses dari operator ke system. Bagian ini terdiri dari tiga switch, yaitu :
 - *Key Off* : operator hanya dapat mengoperasikan dan memonitor fungsi-fungsi control yang telah ditetapkan pada system
 - *Key On* : operator dapat mengoperasikan semua fungsi pada *keyboard* serta dapat membuat fungsi *utility* dan program BASIC.
 - *Eng* : berfungsi untuk system *maintanace*

g. *Connector Nest*(CNN-30ES) dan *Card*

Nest ini digabungkan dengan *interface connector* yang digunakan untuk menghubungkan peralatan I/O ke *EOPS Operator Station*. *Nest* ini menyediakan *connector board*, *I/O card* dan *Coupler*.

B. EOPC (Enhanced Operator Console)

Adalah suatu *operator console* yang tidak mempunyai CPU atau bagian intelejen. Bagian ini berfungsi sebagai pendukung pusat pengendalian operasi dan *monitoring* (*operator station*).

EOPC Operator onsole digunakan untuk memperbanyak *EOPS Opearator Station* sebagai posisi tambahan bagi operator.

Setiap *EOPS Operaor Station* dapat dihubungkan dengan tiga *EOPC Operator Console*, sehingga dengan kata lain setiap *EOPS* dapat mempunyai 4 CRT (*single*), dan 4 *printer*.

C. EPRT2 Serial Printer

Digunakan untuk mencetak data-data histories, fungsi, pesan dan perlakuan operator selama operasi berjalan. Sebuah *EOPS* dapat dihubungkan dengan maksimum 4 buah *EPRT2 Serial Printer*. Suatu konfigurasi system printer dapat dibuat sedemikian sehingga sebuah *EPRT2 Serial Printer* digunakan oleh 2 unit *EOPS Operaor Station*.

EPRT2 Serial Printer terdiri dalam dua tipe, yaitu *EPRT2-C tipe covered desk*, dan *EPRT2-D tipe open desk*.

D. ECHU2 Color Hard Copy Unit

Merupakan bagian yang fungsinya adalah mencetak tampilan pada *screen* CRT dari *EOPS Operaor Station* atau *EOPC Operator Console* dalam bentuk *color graphic hard copy*. Sebuah *ECHU2 Color Hard Copy Unit* dapat dihubungkan dengan 2 unit *EOPS Operaor Station* untuk penggunaan bersama dan dapat memberikan *color graphic hard copy* sampai dengan 8 *screen* CRT.



ECHU2 Color Hard Copy Unit tersedia dalam 2 tipe, yaitu *ECHU2-C* tipe *covered desk* dan *ECHU2-D* tipe *open desk*.

Spesifikasi umum sebuah *ECHU2 Color Hard Copy Unit*, adalah sebagai berikut :

- *Imaging Technology : thermal transfer system*
- *Print Color : 8 color output*
- *Copy Size : 152 x 114 mm*
- *Copy Time: 90 detik/panel untuk kabel penghubung pendek, dan 6 menit / panel untuk kabel penghubung panjang.*

Voice Output Unit merupakan bagian yang dapat mengeluarkan suara, sebagai *voice message* (pesan suara) yang dapat menampilkan pada display *EOPS Operator Station*.

Setiap unit *EOPSS Operator Station* dapat memberikan 32 *analog output* (1-5 V DC) sebagai fasilitas penyambungan *external chart recorder*.

6.1.2. Process Control Function (EFCD)

Process Control Function adalah suatu fasilitas yang melaksanakan fungsi pengendalian terhadap unit-unit proses. Fungsi ini terdapat pada *station-station* yang tersebar di unit-unit proses atau *field*. *Process Control Function* terdapat pada *Process Control Station* atau yang dikenal sebagai *Field Control Function*. Fungsi utama *station* ini adalah melakukan pengendalian proses seperti yang dilakukan oleh kontroler konvensional.

Terdapat beberapa macam *Process Control station* yang disediakan oleh *Centum-XL*, yaitu:

- *EFCS Field Control Station*
- *EFCD Duplexed Field Control Station*
- *EFMS Field Monitoring Station*
- *EFCE Field Control Station for Power Plant*
- *EMCS Master Control Station*
- *EMCD Duplexed Master Control Station*
- *ETBC Signal Conditioner Cubicle*
- *ETBE Signal Conditioner Cubicle for Power Plant*

A. EFCS Field Control Station

Secara umum, suatu *Process Control station* dapat diwakili oleh suatu *EFCS Field Control Station*. *EFCS Field Control Station* merupakan *Control Station* yang terdistribusi di *field*. Fungsinya adalah melakukan fungsi pengendalian pada *process plant*. *Station* ini ditempatkan terdistribusi di unit-unit proses.

Secara umum konfigurasi sebuah *EFCS Field Control Station* adalah terdiri dari :



- *Station Control Nest (SCN)* 1 unit
- *I/O Nest* s/d 5 unit
- *Power Supply* 1 unit
- *Power Signaling Cable* 2 unit
- *Duplexed Power Supply* (untuk *signal conditioner* dan *fan*)
- *Signal conditioner Nest* atau *Terminal Board* s/d 12 unit

1. Station Control Nest (SCN)

Station Control Nest (SCN) merupakan bagian CPU yang mengimplementasikan *feedback control* maupun *sequence control*.

I/O Nest

I/O Nest terdiri dari beberapa *card*, yaitu:

- *I/O Card*
- *Nest Common Card (Internal Bus Interface)*
- *Power Supply Card*

Fungsi *I/O Nest* adalah sebagai tempat menampung beberapa *I/O Card*. Dalam sebuah *rack cabinet EFCS Field Control Station* dengan kapasitas maksimum 5 unit *I/O Nest*. Sedangkan dalam satu *I/O Nest* dapat ditempatkan maksimum 8 unit *I/O Card*.

Terdapat dua macam *I/O Card*, yaitu :

- *I/O Card Analog* yang berfungsi untuk mengkonversikan sinyal analog menjadi sinyal digital atau sebaliknya. *Card* ini berlaku seperti sebuah *Analog-to-Digital Converter (ADC)* atau sebuah *Digital-to-Analog Converter (DAC)*.
- *I/O Card Digital* yang berfungsi untuk memproses sinyal kontak untuk implementasi *sequence control*.

Signal Conditioner Nest

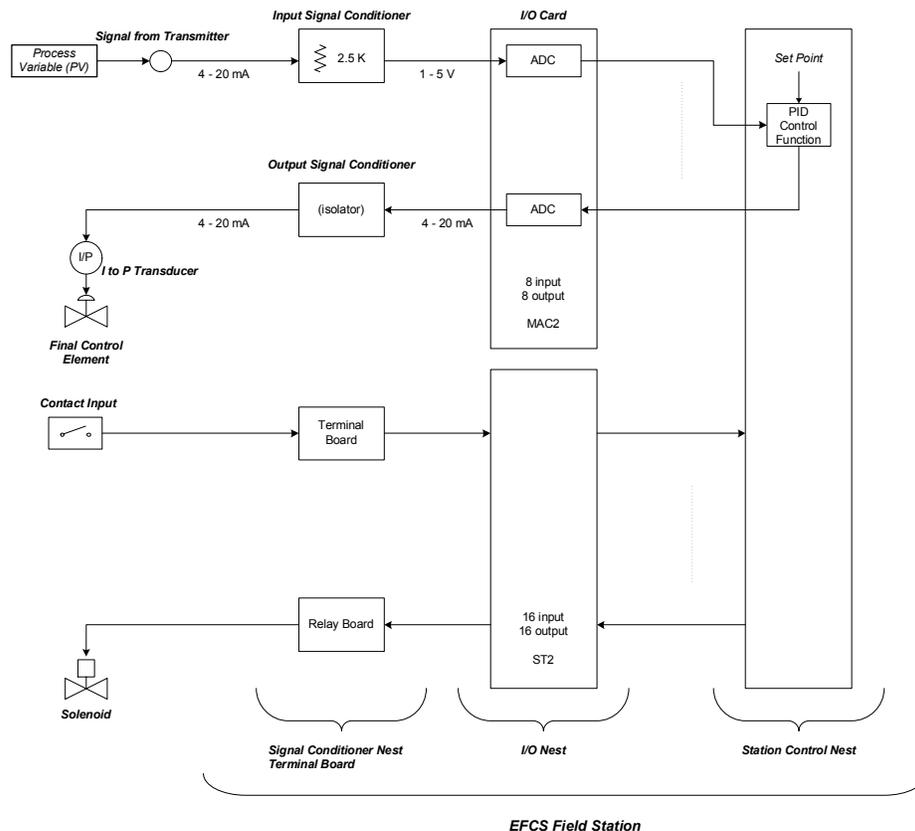
Bagian ini terdiri dari dua macam, yaitu :

- *Input Signal Conditioner* yang berfungsi untuk mengubah sinyal analog (sinyal 4 - 20 mA, sinyal mV dan sinyal pulse) menjadi sinyal analog 1 - 5 V
- *Output Signal Conditioner* yang berfungsi sebagai isolator

Gambar 6.03. di atas mengilustrasikan cara kerja dan aliran sinyal pada *EFCS Field Control Station*, mulai dari penerimaan sinyal dari *field* sampai pengiriman sinyal kembali ke *field*.

Sinyal analog 4 - 20 mA yang berasal dari *Trasmitter* di *field* ditransmisikan ke *Input Signal Conditioner* untuk diubah menjadi sinyal analog 1 - 5 V.

kemudian sinyal analog 1 – 5 V ini diubah oleh *I/O Card* yang berperan sebagai *Analog-to-Digital Converter* (ADC) menjadi sinyal digital untuk selanjutnya masuk ke *Station Control Nest* pada CPU. Di CPU inilah implementasi fungsi control PID terjadi.



Gambar. 6.03. Aliran sinyal pada *EFCS Field Control Station*

Sinyal digital yang telah diproses dalam SCN, kemudian akan dikirimkan kembali ke lapangan (*field*) sebagai *Manipulated variable* (MV). Sebelumnya sinyal ini diubah menjadi sinyal analog 4 – 20 mA oleh *I/O Card* yang berperan sebagai DAC. Sinyal 4 – 20 mA ini kemudian ditransmisikan ke *Final Control Element* melalui *Output Signal Conditioner*. Sinyal analog ini merepresentasikan besaran *manipulated variable* (MV).

Current-to-pressure Transducer (*I/P Transducer*) dapat digunakan apabila penggerak (*actuator*) dari *Final Control Element* adalah *pneumatik*.

Terminal Board

Terminal-terminal pada *terminal board* digunakan untuk menghubungkan kontak sinyal *input / output* dengan *I/O card digital* didalam *I/O Nest* (untuk *sequence control*). Didalam satu unit *rack cabinet EFCS Field Control Station*,

maksimum *Signal Conditioner Nest* atau *Terminal Board* yang dapat dipasang adalah 12 unit.

B. EFCD Duplexed Field Control Station

Pada dasarnya proses yang terdapat pada *EFCD Duplexed Field Control Station* adalah sama dengan *EFCS Field Control Station*. Perbedaannya terdapat pada adanya beberapa bagian yang diduplikasi (*duplexed*) pada *EFCD Duplexed Field Control Station*. Bagian yang *duplexed* adalah *Station Control Unit (SCU)* pada *Station Control Nest*, *Power Supply Unit* dan *Nest Common Card* pada *I/O Nest* terdapat 2 unit *Power Supply* dan 2 *Nest Common Card*.

Tujuan dari metode *duplexed* tersebut adalah untuk meningkatkan dan menjamin kehandalan pada system.

Metode *dual redundancy* diterapkan pada *Duplexed Station Control Nest* dengan tujuan agar proses kontrol dapat terus berlangsung walaupun terjadi kegagalan (*failure*) pada salah satu SCU. Setiap *card* yang ada didalam SCN memiliki duplikatnya masing-masing, dan digunakan sebagai *backup* (*standby redundancy*). Apabila SCU mengalami kerusakan atau kegagalan, maka proses control selanjutnya dialihkan ke SCU yang *standby*.



Gambar 6.04. *EFCD Duplexed Field Control Station*

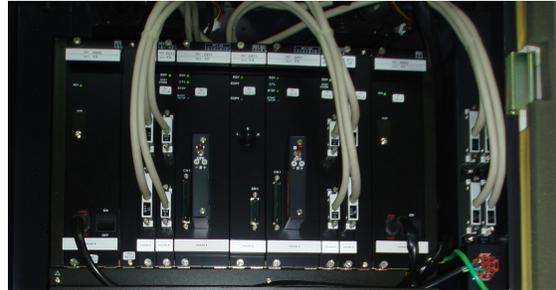
Pada kondisi normal, SCU yang *standby* selalu melakukan *self diagnosis*, yaitu mengenali apabila ada masalah dan dapat segera mengambil alih tugas SCU yang bermasalah.

Bagian yang mengatur proses pengambil-alihan tugas tersebut adalah *Duplexed Control Unit*. *Duplexed Control Unit* berfungsi untuk memonitor dan mengatur keadaan dari kedua *Station Control Unit*. Apabila *Station Control Unit* utama mengalami kegagalan, maka secara otomatis *Duplexed Control Unit* akan

memberikan wewenang kepada *Station Control Unit* yang *Standby* untuk mengambil-alih proses.

1. Duplexed Station Control Nest

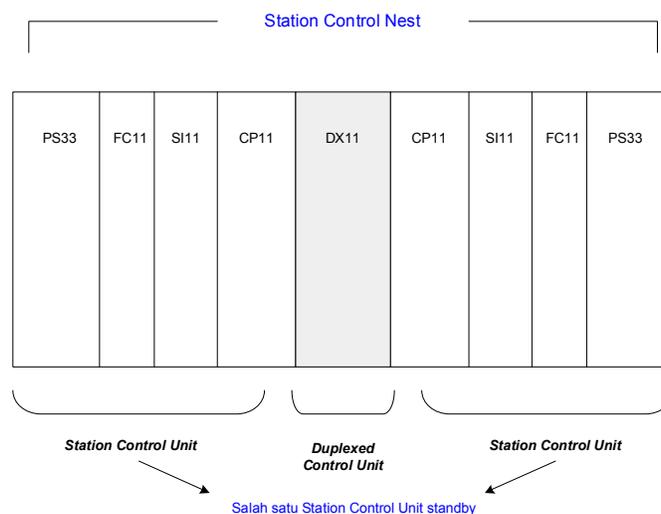
Station Control Nest memiliki sifat *dual redundancy (duplexed)* yaitu menggabungkan 2 set *station control Unit* dan 1 unit *Duplexed Control Unit*.



Gambar 6.05. Duplexed Station Control Nest

Konfigurasi sebuah *Station Control Nest* adalah sebagai berikut :

- DX11 : *Duplexed Control Card* 1 unit
- SI11 : *Station Internal Communication Card* 2 unit
- FC11 : *HF Bus Control Card* 2 unit
- CP11 : *Processor Card* 2 unit
- PS33 : *Power Supply Card* 2 unit



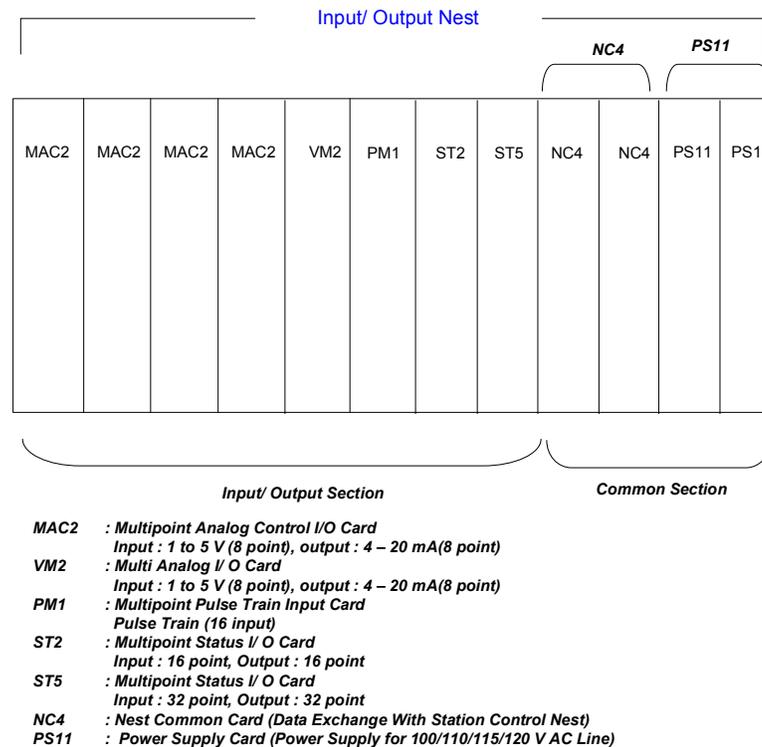
Gambar 6.06. Konfigurasi Duplexed Station Control Nest.

I/O Nest

Fungsi *I/O Nest* adalah sebagai tempat menampung beberapa *I/O Card*. Satu unit *EFCD Duplexed Field Control Station* dapat menampung sampai dengan 5 unit *I/O Nest*.



Gambar 6.07. *Input /Output Nest*



Gambar 6.08. Konfigurasi *I/O Nest*.



I/O Nest terdiri dari dua seksi, yaitu :

1. *I/O Section* yang terdiri dari *I/O Card*
2. *Duplexed Common Section*, yaitu:
 - *Power Supply Card* sebagai penyuplai daya kesetiap *I/O Card*
 - *Nest Common Card (Internal Bus Interface)* yaitu sebagai antarmuka pertukaran data dengan *Station Control Nest (SCN)*

Signal Conditioner Nest

Signal Conditioner Nest menghubungkan sinyal dari *field* untuk masuk ke *I/O Card*. Bagian ini berfungsi untuk mengubah sinyal 4 – 20 mA menjadi 1 – 5 V yang kemudian ditransmisikan ke *I/O Card*. Bagian ini juga berfungsi sebagai isolator yang menghubungkan sinyal analog dari *I/O Card* ke *field*.

Power untuk signal *Conditioner Card* adalah 24 volt yang disuplai oleh DC *Power Supply Unit* (110 V AC) yang terdapat di bagian belakang atas *rack cabinet EFCD Duplexed Field Control Station*.

6.1.3. Data Communication Facilities

Bagian ini berfungsi sebagai fasilitas komunikasi dan pertukaran data antara sesama *Process Control Station*, antara *MMI* dengan *Process Control Function*, maupun antara *Process Control Function* dengan *station-station* yang terhubung dengan *SV-Net*. Fasilitas *data link* yang tersedia pada *Centum-XL*, adalah :

A. HF – Bus

HF-Bus adalah *communication bus* dengan system komunikasi yaitu *token passing process highway*, yang berfungsi sebagai media komunikasi data secara *real time* ke *station-station* yang terhubung pada *HF-Bus*, terutama antara *EFCS Field Control Station*, *EFCD Duplexed Field Control Station*, dan *EFMS Field Monitoring Station* dengan *EOPS Operator Station*.

B. SV -Net

SV -Net adalah sebuah *Local Area Network (LAN)* atau *Communication bus* berbasis *Manufacturing Automation Protocol (MAP)* dan digunakan untuk menghubungkan *EOPS Operator Station* ke *ECMP Computer Station*, *AI Workstation* atau *YEWCOM 9000 Supervisory Computer*.

6.2. Konfigurasi DCS Centum-XL di Kilang Pertamina UP VI Balongan

Tabel berikut ini memperlihatkan konfigurasi DCS *Centum-XL* di Kilang Pertamina UP VI Balongan dengan lokasi *EOPS*, *EFCD* serta unit proses yang dikendalikan.



Tabel Konfigurasi DCS *Centum-XL* di Kilang Pertamina UP VI Balongan

Group	Lokasi EOPS	Lokasi EFCD	Unit Proses
<i>Group 1</i>	<i>OCCR</i>	<i>Out station 15</i>	Unit 11 CDU
		<i>Out station 16</i>	Unit 23 AMINE Unit 24 SW Unit 25 SRU
<i>Group 2</i>	<i>OCCR</i>	<i>Out station 13</i>	Unit 12 ARHDM 1
			Unit 13 ARHDM 2
<i>Group 3</i>	<i>OCCR</i>	<i>Out station 11</i>	Unit 22 H2P
		<i>Out station 12</i>	Unit 14 GO HTU Unit 21 LCO HTU
<i>Group 4</i>	<i>OCCR</i>	<i>Out station 14</i>	Unit 15-20 RCC Comlex
<i>Utilities</i>	Generator CR	<i>Aux. Rack Room</i>	Unit <i>Utilities</i>
<i>Offsite</i>	<i>OCR</i>	<i>Offsite Aux. Rack Room</i>	Unit <i>Offsite</i>

Gambar arsitektur DCS *Centum XL* di kilang UP-VI Balongan dapat dilihat pada lampiran

- Overall System Configuration Drawing Group 1
- Overall System Configuration Drawing Group 2
- Overall System Configuration Drawing Group 3
- Overall System Configuration Drawing Group 4
- Overall System Configuration Drawing Utilities
- Overall System Configuration Drawing Offsite



DAFTAR PUSTAKA

1. Ogata, Katsuhiko. *"Modern Control Engineering"*, 3rd Edition, Prentice Hall International Inc. 1997.
2. Smith, Carlos A & Carripio, Armando B. *"Principles And Practice Of Automatic Process Control"*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc.
3. Andrew W.G & Willams H.B, *"Applied Instrumentation In The Process Industries"*, Volume II *Practical Guideines*, 2nd Edition, Gulfpublishing Company
4. Fisher, *"Control Valve Handbook"*, Emerson Process Management.
5. Gunterus, Frans. *Falsafah Dasar: Sistem Pengendalian Proses*. ElexMedia Komputindo.
6. Parura, Samuel LB, *"Modul DCS Yokogawa Centum-XL"*, Proyek Enjiniring. Pertamina UP VI Balongan