

Dasar-Dasar Instrumentasi, Sistem Kontrol, dan Kelistrikan Industri

Editor: Ir. Eko Aris Budi Cahyono, M.Eng.



Dasar-Dasar Instrumentasi, Sistem Kontrol, dan Kelistrikan Industri

Dr. Eng. Ir. Petrus Sutyasadi, dkk.

Editor: Ir. Eko Aris Budi Cahyono, M.Eng.

PT BUKULOKA LITERASI BANGSA

Anggota IKAPI: No. 645/DKI/2024



Dasar-Dasar Instrumentasi, Sistem Kontrol, dan Kelistrikan Industri

Penulis : Dr. Eng. Ir. Petrus Sutiyasadi, Ir. Dian Artanto, S.T., M.Eng.,
Ir. Eko Aris Budi Cahyono, M.Eng., Ir. Bernardinus Sri
Widodo, M.Eng., Ir. Pippie Arbiyanti, M.Eng., Ir.
Muhammad Prayadi Sulistyanto, M.Eng., Ir. Antonius
Hendro Noviyanto, M.T., Ir. Agus Siswoyo, S.T., M.T., dan
Ir. Eko Arianto, S.T., M.T.
ISBN : 978-634-324-210-9 (PDF)
Penyunting Naskah : Ir. Eko Aris Budi Cahyono, M.Eng.
Tata Letak : Fahrul Rozi
Desain Sampul : Novikean Keysah Sanisri

Penerbit

Penerbit PT Bukuloka Literasi Bangsa
Distributor: PT Yapindo
Kompleks Business Park Kebon Jeruk Blok I No. 21, Jl. Meruya Ilir Raya No. 88,
Desa/Kelurahan Meruya Utara, Kecamatan Kembangan, Kota Adm. Jakarta Barat, Provinsi
DKI Jakarta, Kode Pos: 11620
Email: penerbit.blb@gmail.com
Whatsapp: 0878-3483-2315
Website: bukuloka.com

© Hak cipta dilindungi oleh undang-undang

Berlaku selama 50 (lima puluh) tahun sejak ciptaan tersebut pertama kali dilakukan pengumuman.

Dilarang mengutip atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari penerbit. Ketentuan Pidana Sanksi Pelanggaran UU No. 28 Tahun 2014 Tentang Hak Cipta.

Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak melakukan perbuatan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 2 ayat (1) atau Pasal 49 ayat (1) dan ayat (2) dipidana dengan pidana penjara masing-masing paling singkat 1 (satu) bulan dan/atau denda paling sedikit Rp1.000.000,00 (satu juta rupiah), atau pidana penjara paling lama 7 (Tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah).

Barang siapa dengan sengaja menyerahkan, menyiarkan, memamerkan, mengedarkan atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga buku referensi berjudul **Dasar-Dasar Instrumentasi, Sistem Kontrol, dan Kelistrikan Industri** dapat hadir sebagai sumber informasi mengenai konsep dasar teknologi yang berperan penting dalam dunia industri modern. Buku ini membahas pemahaman mengenai instrumentasi, sistem pengendalian, serta kelistrikan industri yang menjadi bagian penting dalam mendukung perkembangan teknologi dan proses kerja di berbagai sektor.

Buku ini disebarluaskan untuk masyarakat umum yang ingin mengenal lebih jauh tentang dunia instrumentasi, kontrol, dan sistem kelistrikan industri. Penyajian materi dibuat secara sederhana dan mudah dipahami agar pembaca dapat memperoleh gambaran mengenai fungsi, penerapan, serta peran teknologi tersebut dalam kehidupan dan perkembangan industri.

Semoga buku ini dapat memberikan manfaat, menambah wawasan, serta menjadi sumber pengetahuan yang bermanfaat bagi para pembaca. Terima kasih disampaikan kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan sehingga buku ini dapat diterbitkan dan dinikmati oleh masyarakat luas.

Jakarta, Agustus 2026

Tim Penyusun

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	iii
DAFTAR ISI.....	iv
Bab 1: Pendahuluan Sistem Industri Modern.....	1
Dr. Eng. Ir. Petrus Sutyasadi.....	1
1.1 Peran Kelistrikan Industri.....	1
1.2 Peran Instrumentasi	6
1.3 Peran Sistem Kontrol.....	11
1.4 Integrasi Sistem Industri.....	14
1.5 Keselamatan Kerja Industri	18
Bab 2: Keselamatan Kelistrikan Industri.....	23
Ir. Bernardinus Sri Widodo, M.Eng.	23
2.1 Bahaya Listrik	23
2.2 LOTO (Lockout Tagout)	28
2.3 Grounding.....	34
2.4 PPE (Personal Protective Equipment)	38
2.5 Arc Flash	42
Bab 3: Sistem Distribusi Tenaga Listrik Industri.....	47
Ir. Dian Artanto, S.T., M.Eng.....	47
3.1 Source to Load.....	47
3.2 Sistem Distribusi	50

3.3 Panel Listrik.....	54
3.4 Single Phase dan Three Phase	58
3.5 Transformator	61
Bab 4: Sistem Proteksi Kelistrikan.....	65
Ir. Dian Artanto, S.T., M.Eng.	65
4.1 Fuse	65
4.2 MCB	68
4.3 MCCB (Molded Case Circuit Breaker)	72
4.4 Overload Relay	76
4.5 ELCB/RCCB	80
Bab 5: Pemeriksaan dan Perawatan Sistem Kelistrikan.....	84
Ir. Muhammad Prayadi Sulistyanto, M.Eng.	84
5.1 Autonomous Maintenance	84
5.2 Inspeksi Kelistrikan	88
5.3 Wiring Diagram.....	92
5.4 Troubleshooting Dasar	95
Bab 6: Dasar-Dasar Instrumentasi.....	99
Ir. Antonius Hendro Noviyanto, M.T.	99
6.1 Variabel Proses	99
6.2 Sistem Pengukuran	103
6.3 Sensor dan Transduser.....	107
6.4 Akurasi dan Presisi	111

Bab 7: Sensor dan Sistem Pengukuran Industri	114
Ir. Agus Siswoyo, S.T., M.T.....	114
7.1 Sensor Suhu	114
7.2 Sensor Tekanan	118
7.3 Sensor Proximity	122
7.4 Encoder.....	126
7.5 Sistem Pengukuran	129
Bab 8: Sinyal Analog dan Digital	133
Ir. Eko Aris Budi Cahyono, M.Eng.....	133
8.1 Analog Signal	133
8.2 Digital Signal.....	137
8.3 4–20 mA	141
8.4 0–10 Volt	145
8.5 Digital I/O.....	148
Bab 9: Dasar-Dasar Kalibrasi Instrumentasi.....	152
Ir. Antonius Hendro Noviyanto, M.T.....	152
9.1 Konsep Kalibrasi	152
9.2 Zero dan Span.....	156
9.3 Standar Kalibrasi	160
9.4 Prosedur Dasar Kalibrasi	164
Bab 10: Dasar Sistem Kontrol	167
Ir. Pippie Arbiyanti, M.Eng.	167

10.1 Open Loop Control System	167
10.2 Closed Loop.....	171
10.3 Feedback.....	175
10.4 Setpoint.....	179
10.5 Error System.....	182
Bab 11: Sistem Kontrol Sekuensial	186
Ir. Pippie Arbiyanti, M.Eng.	186
11.1 Sequence Control.....	186
11.2 Interlocking.....	190
11.3 Timer	195
11.4 Counter	199
Bab 12: PLC dan Relay Logic.....	202
Dr. Eng. Ir. Petrus Sutyasadi.....	202
12.1 Dasar PLC	202
12.2 Struktur PLC.....	206
12.3 Ladder Diagram.....	211
12.4 Relay Logic	216
Bab 13: Motor dan Aktuator Industri	220
Ir. Eko Aris Budi Cahyono, M.Eng.	220
13.1 Motor Induksi	220
13.2 Servo Motor.....	224
13.3 Driver Motor.....	227

13.4 Aktuator Industri	231
Bab 14: Sistem Umpan Balik Posisi.....	236
Dr. Eng. Ir. Petrus Sutiyasadi.....	236
14.1 Encoder.....	236
14.2 Resolver.....	240
14.3 Position Feedback.....	243
Bab 15: Integrasi Sistem Otomasi Industri	248
Ir. Agus Siswoyo, S.T., M.T.....	248
15.1 Sensor–Controller–Actuator.....	248
15.2 Sistem Otomasi Dasar	251
15.3 Integrasi Sistem Industri.....	255
15.4 Mini Project Automation	258
Bab 16: Tren Teknologi Industri Modern	261
Ir. Eko Arianto, S.T., M.T.....	261
16.1 Industry 4.0.....	261
16.2 Industrial Internet of Things (Industrial IoT)	265
16.3 Smart Factory	268
16.4 Predictive Maintenance	271
DAFTAR PUSTAKA.....	275
PROFIL PENULIS	283

Bab 1: Pendahuluan Sistem Industri Modern

Dr. Eng. Ir. Petrus Sutiyasadi

1.1 Peran Kelistrikan Industri

Kelistrikan industri merupakan salah satu elemen fundamental dalam sistem industri modern yang berfungsi sebagai sumber energi utama untuk mendukung berbagai proses produksi dan operasional. Seiring dengan perkembangan teknologi dan otomatisasi, kebutuhan terhadap sistem kelistrikan yang andal, efisien, dan aman semakin meningkat. Hampir seluruh aktivitas industri saat ini bergantung pada energi listrik, mulai dari pengoperasian mesin produksi, sistem pengendalian otomatis, penerangan, hingga infrastruktur pendukung lainnya.



Gambar 1.1. Penggunaan IoT pada Industri

Sumber: <https://share.google/KOv0YQI3ipiht0bmK>

Dalam era revolusi industri yang ditandai oleh penerapan teknologi digital, *Internet of Things (IoT)*, dan sistem otomatisasi cerdas, kelistrikan tidak hanya berfungsi sebagai penyedia energi, tetapi juga sebagai bagian integral dari sistem pengendalian dan komunikasi industri. Oleh karena itu, pemahaman mengenai peran kelistrikan industri menjadi sangat penting dalam mendukung keberlangsungan dan peningkatan produktivitas sektor industri modern.

1.1.1 Pengertian Kelistrikan Industri

Kelistrikan industri dapat didefinisikan sebagai sistem yang mencakup pembangkitan, distribusi, pengendalian, dan pemanfaatan energi listrik untuk mendukung aktivitas operasional dalam lingkungan industri. Sistem ini melibatkan berbagai komponen seperti generator, transformator, panel distribusi, motor listrik, sistem proteksi, serta perangkat pengendalian yang bekerja secara terintegrasi untuk menjamin pasokan energi yang stabil dan aman.

Berbeda dengan sistem kelistrikan rumah tangga yang umumnya memiliki kapasitas daya relatif kecil, sistem kelistrikan industri dirancang untuk menangani kebutuhan energi dalam jumlah besar dan beroperasi secara kontinu. Oleh karena itu, sistem kelistrikan industri memerlukan perencanaan, pengoperasian, dan pemeliharaan yang lebih kompleks agar mampu memenuhi tuntutan proses produksi yang berlangsung secara terus-menerus.

Dalam praktiknya, kelistrikan industri tidak hanya berkaitan dengan penyediaan energi listrik, tetapi juga mencakup pengaturan kualitas daya (*power quality*), efisiensi energi, serta keandalan

sistem distribusi. Gangguan kecil pada sistem kelistrikan dapat menyebabkan penghentian proses produksi yang berdampak pada kerugian ekonomi yang signifikan. Oleh sebab itu, sistem kelistrikan industri dirancang dengan mempertimbangkan aspek keamanan, keandalan, dan keberlanjutan operasional.

Perkembangan teknologi digital juga telah memperluas cakupan kelistrikan industri melalui integrasi sistem pemantauan dan pengendalian berbasis komputer. Dengan adanya teknologi tersebut, pengelolaan energi dapat dilakukan secara lebih efektif dan efisien sehingga mendukung peningkatan produktivitas industri secara keseluruhan.

1.1.2 Fungsi Kelistrikan dalam Sistem Industri

Kelistrikan memiliki berbagai fungsi penting dalam mendukung aktivitas industri modern. Fungsi utama kelistrikan adalah sebagai sumber tenaga untuk mengoperasikan berbagai mesin dan peralatan produksi. Motor listrik, misalnya, digunakan untuk menggerakkan konveyor, pompa, kompresor, kipas industri, serta berbagai mesin manufaktur yang menjadi bagian dari proses produksi.

Selain sebagai sumber tenaga, kelistrikan juga berfungsi sebagai media pengendalian dalam sistem otomatisasi industri. Berbagai sensor, *programmable logic controller (PLC)*, aktuator, dan sistem kendali lainnya memanfaatkan energi listrik untuk mengatur jalannya proses produksi secara otomatis. Penggunaan sistem otomatisasi memungkinkan peningkatan efisiensi, akurasi, dan konsistensi dalam kegiatan produksi.

Kelistrikan juga berperan dalam mendukung sistem penerangan industri. Pencahayaan yang memadai sangat penting untuk menciptakan lingkungan kerja yang aman dan nyaman bagi tenaga kerja. Selain meningkatkan produktivitas, sistem penerangan yang baik juga membantu mengurangi risiko kecelakaan kerja di area industri.

Fungsi lainnya adalah sebagai pendukung sistem komunikasi dan teknologi informasi. Dalam industri modern, berbagai perangkat komunikasi, jaringan komputer, dan sistem pemantauan digital memerlukan pasokan energi listrik yang stabil agar dapat beroperasi secara optimal. Dengan demikian, kelistrikan menjadi fondasi yang mendukung integrasi berbagai teknologi dalam lingkungan industri.

Menurut Wildi (2023), sistem kelistrikan industri memiliki peran strategis dalam menjamin kontinuitas operasi, meningkatkan efisiensi produksi, dan mendukung penerapan teknologi otomatisasi yang menjadi ciri utama industri modern.

1.1.3 Kontribusi Kelistrikan terhadap Produktivitas Industri

Kelistrikan memberikan kontribusi yang sangat besar terhadap peningkatan produktivitas dan daya saing industri. Salah satu kontribusi utamanya adalah memungkinkan proses produksi berlangsung secara lebih cepat dan efisien dibandingkan sistem yang masih mengandalkan tenaga manual atau sumber energi konvensional lainnya.

Penggunaan motor listrik dan sistem otomatisasi memungkinkan perusahaan meningkatkan kapasitas produksi tanpa harus menambah jumlah tenaga kerja secara signifikan. Selain itu,

sistem kelistrikan yang andal membantu mengurangi waktu henti (*downtime*) akibat gangguan operasional sehingga proses produksi dapat berjalan lebih konsisten.

Kelistrikan juga berkontribusi dalam meningkatkan kualitas produk. Dengan adanya sistem kontrol otomatis yang berbasis energi listrik, proses produksi dapat dilakukan dengan tingkat presisi yang lebih tinggi. Hal ini memungkinkan perusahaan menghasilkan produk yang memiliki kualitas seragam dan memenuhi standar yang ditetapkan.

Di sisi lain, perkembangan teknologi manajemen energi memungkinkan perusahaan mengoptimalkan penggunaan listrik sehingga biaya operasional dapat ditekan. Sistem pemantauan energi modern mampu mengidentifikasi pola konsumsi listrik dan memberikan informasi yang diperlukan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan energi.

Kelistrikan juga mendukung penerapan konsep industri berkelanjutan melalui penggunaan teknologi hemat energi dan integrasi sumber energi terbarukan. Berbagai industri mulai memanfaatkan sistem pembangkit listrik tenaga surya, penyimpanan energi, dan teknologi *smart grid* untuk meningkatkan efisiensi sekaligus mengurangi dampak lingkungan dari aktivitas industri.

Menurut Gonen (2024), keberhasilan transformasi industri menuju sistem yang lebih modern dan berkelanjutan sangat bergantung pada ketersediaan sistem kelistrikan yang andal, efisien, dan mampu mendukung perkembangan teknologi industri. Oleh karena itu, kelistrikan tidak hanya berfungsi sebagai sumber energi,

tetapi juga sebagai faktor strategis yang menentukan keberhasilan operasional dan pertumbuhan industri pada era modern.

1.2 Peran Instrumentasi

Perkembangan sistem industri modern ditandai oleh meningkatnya penggunaan teknologi otomatisasi, digitalisasi, dan pengendalian proses yang semakin kompleks. Dalam lingkungan industri yang menuntut efisiensi, kualitas, dan keselamatan kerja yang tinggi, diperlukan sistem yang mampu memantau serta mengendalikan berbagai parameter proses secara akurat dan berkelanjutan. Salah satu komponen penting yang mendukung tercapainya tujuan tersebut adalah instrumentasi.

Instrumentasi merupakan bidang yang berkaitan dengan pengukuran, pemantauan, dan pengendalian variabel proses dalam suatu sistem industri. Variabel yang dimaksud dapat berupa suhu, tekanan, laju aliran, ketinggian cairan, kelembapan, maupun parameter fisik lainnya yang memengaruhi kinerja proses produksi. Melalui sistem instrumentasi, informasi mengenai kondisi proses dapat diperoleh secara real-time sehingga operator maupun sistem kontrol dapat mengambil tindakan yang sesuai untuk menjaga stabilitas operasi.

Dalam industri modern, instrumentasi tidak hanya berfungsi sebagai alat ukur, tetapi juga menjadi bagian integral dari sistem otomasi dan pengambilan keputusan. Oleh karena itu, pemahaman

mengenai peran instrumentasi sangat penting dalam mendukung efisiensi, produktivitas, dan keberlanjutan sistem industri.

1.2.1 Instrumentasi sebagai Sistem Pengukuran dan Pemantauan

Fungsi utama instrumentasi adalah melakukan pengukuran terhadap berbagai variabel yang terdapat dalam proses industri. Pengukuran tersebut dilakukan menggunakan berbagai jenis sensor dan perangkat ukur yang dirancang untuk mendeteksi perubahan kondisi fisik maupun kimia secara akurat. Data yang diperoleh kemudian digunakan sebagai dasar dalam pemantauan dan pengendalian proses.

Dalam sistem industri, pengukuran yang akurat sangat penting karena kualitas produk dan kestabilan proses sangat bergantung pada nilai variabel yang terkontrol. Sebagai contoh, pada industri makanan dan minuman, suhu harus dijaga dalam rentang tertentu untuk memastikan kualitas produk dan keamanan pangan. Demikian pula pada industri kimia, tekanan dan laju aliran harus dipantau secara terus-menerus untuk mencegah terjadinya gangguan proses maupun kecelakaan kerja.

Sistem pemantauan yang didukung oleh instrumentasi memungkinkan operator memperoleh informasi kondisi peralatan dan proses secara langsung. Informasi tersebut dapat ditampilkan melalui panel kontrol, sistem *Human Machine Interface* (HMI), maupun pusat kendali berbasis komputer. Dengan adanya pemantauan yang berkesinambungan, penyimpangan proses dapat

dideteksi lebih awal sehingga tindakan korektif dapat dilakukan sebelum terjadi kerusakan yang lebih serius.

Selain meningkatkan akurasi operasional, sistem instrumentasi juga membantu proses dokumentasi data. Data hasil pengukuran dapat disimpan dan dianalisis untuk keperluan evaluasi kinerja, perencanaan pemeliharaan, serta peningkatan efisiensi produksi. Menurut Bentley (2023), sistem pengukuran yang andal merupakan fondasi utama dalam implementasi sistem otomasi industri yang modern dan efektif.

1.2.2 Instrumentasi dalam Sistem Pengendalian Otomatis

Peran instrumentasi dalam industri modern tidak hanya terbatas pada pengukuran dan pemantauan, tetapi juga sebagai bagian penting dari sistem pengendalian otomatis. Sistem pengendalian otomatis bekerja dengan cara membandingkan nilai aktual suatu variabel proses dengan nilai yang diinginkan atau *set point*. Jika terjadi penyimpangan, sistem akan memberikan respons secara otomatis untuk mengembalikan kondisi proses ke keadaan yang telah ditentukan.

Dalam mekanisme tersebut, instrumentasi berperan sebagai sumber informasi yang menyediakan data proses secara terus-menerus. Sensor mendeteksi kondisi lapangan, kemudian sinyal hasil pengukuran dikirim ke pengendali (*controller*). Selanjutnya, pengendali mengolah informasi tersebut dan memberikan perintah kepada aktuator untuk melakukan tindakan yang diperlukan.

Sebagai contoh, pada sistem pengendalian suhu sebuah tangki pemanas, sensor temperatur akan mengukur suhu aktual

cairan di dalam tangki. Jika suhu berada di bawah nilai yang telah ditetapkan, sistem kontrol akan mengaktifkan elemen pemanas. Sebaliknya, jika suhu melebihi batas yang ditentukan, sistem akan mengurangi atau menghentikan suplai panas. Proses ini berlangsung secara otomatis tanpa memerlukan intervensi operator secara terus-menerus.

Penerapan sistem pengendalian otomatis memberikan berbagai keuntungan, seperti peningkatan konsistensi kualitas produk, pengurangan kesalahan manusia, serta peningkatan efisiensi operasional. Selain itu, sistem otomatis mampu bekerja secara cepat dan presisi dalam menghadapi perubahan kondisi proses. Oleh karena itu, instrumentasi menjadi salah satu elemen yang tidak dapat dipisahkan dari perkembangan otomasi industri modern.

1.2.3 Kontribusi Instrumentasi terhadap Efisiensi dan Keselamatan Industri

Selain mendukung pengukuran dan pengendalian proses, instrumentasi juga memberikan kontribusi besar terhadap peningkatan efisiensi dan keselamatan kerja di lingkungan industri. Efisiensi operasional dapat dicapai melalui pemantauan yang akurat terhadap penggunaan energi, bahan baku, serta kinerja peralatan produksi. Dengan mengetahui kondisi proses secara real-time, perusahaan dapat mengidentifikasi sumber pemborosan dan melakukan perbaikan secara lebih cepat.

Instrumentasi juga berperan penting dalam program pemeliharaan prediktif (*predictive maintenance*). Data yang diperoleh dari berbagai sensor dapat digunakan untuk mendeteksi

gejala awal kerusakan pada mesin dan peralatan. Dengan demikian, tindakan perawatan dapat dilakukan sebelum terjadi kegagalan yang menyebabkan penghentian produksi atau kerusakan yang lebih besar.

Dari aspek keselamatan, instrumentasi berfungsi sebagai sistem peringatan dini terhadap kondisi yang berpotensi membahayakan. Sensor tekanan, sensor gas, sensor temperatur, dan berbagai perangkat keselamatan lainnya digunakan untuk mendeteksi kondisi abnormal yang dapat menimbulkan risiko kecelakaan. Ketika parameter proses melebihi batas aman, sistem akan memberikan alarm atau bahkan melakukan penghentian proses secara otomatis untuk mencegah terjadinya insiden.

Perkembangan teknologi *Industrial Internet of Things* (IIoT), kecerdasan buatan (*artificial intelligence*), dan sistem analitik data semakin memperluas peran instrumentasi dalam industri modern. Data yang dikumpulkan oleh instrumen kini dapat dianalisis secara lebih mendalam untuk mendukung pengambilan keputusan yang cepat dan akurat. Menurut Lipták (2024), integrasi instrumentasi dengan teknologi digital telah menjadi faktor utama dalam transformasi industri menuju konsep *smart manufacturing* dan Industri 4.0.

Secara keseluruhan, instrumentasi memiliki peranan yang sangat penting dalam sistem industri modern. Instrumentasi berfungsi sebagai sarana pengukuran, pemantauan, dan pengendalian yang memungkinkan proses industri berjalan secara efisien, stabil, dan aman. Selain mendukung otomatisasi,

instrumentasi juga berkontribusi terhadap peningkatan produktivitas, penghematan sumber daya, serta pengurangan risiko kecelakaan kerja. Dengan semakin berkembangnya teknologi industri, peran instrumentasi diperkirakan akan terus meningkat sebagai bagian penting dalam mewujudkan sistem produksi yang cerdas, terintegrasi, dan berkelanjutan.

1.3 Peran Sistem Kontrol

Sistem kontrol merupakan salah satu komponen utama dalam sistem industri modern yang berfungsi untuk mengatur, mengawasi, dan mengendalikan berbagai proses agar berjalan sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan. Perkembangan teknologi industri telah mendorong penggunaan sistem kontrol yang semakin canggih untuk meningkatkan efisiensi, produktivitas, kualitas produk, serta keselamatan kerja. Dalam lingkungan industri modern, sistem kontrol digunakan pada berbagai sektor, seperti manufaktur, energi, transportasi, petrokimia, dan pengolahan makanan.

Penerapan sistem kontrol memungkinkan berbagai proses industri berlangsung secara otomatis dengan tingkat akurasi yang tinggi. Melalui pengendalian yang tepat, perusahaan dapat mengurangi kesalahan manusia, mengoptimalkan penggunaan sumber daya, serta meningkatkan konsistensi hasil produksi. Oleh karena itu, sistem kontrol menjadi salah satu fondasi utama dalam implementasi konsep industri modern dan otomatisasi proses.

1.3.1 Fungsi Dasar Sistem Kontrol

Secara umum, sistem kontrol berfungsi untuk menjaga agar suatu proses tetap berada pada kondisi yang diinginkan. Sistem ini bekerja dengan cara membandingkan kondisi aktual dengan nilai acuan (*set point*) yang telah ditentukan. Apabila terjadi penyimpangan, sistem akan memberikan tindakan koreksi sehingga proses dapat kembali ke kondisi yang diharapkan.

Fungsi pengendalian tersebut sangat penting dalam berbagai proses industri yang memerlukan stabilitas dan ketepatan tinggi. Sebagai contoh, pada sistem pemanas industri, suhu harus dijaga pada rentang tertentu agar kualitas produk tetap terjamin. Jika suhu melebihi atau berada di bawah batas yang ditetapkan, sistem kontrol akan mengatur kinerja elemen pemanas secara otomatis.

Selain menjaga kestabilan proses, sistem kontrol juga berfungsi meningkatkan efisiensi operasional dengan mengoptimalkan penggunaan energi, bahan baku, dan waktu produksi. Dengan demikian, perusahaan dapat mencapai target produksi secara lebih efektif sekaligus mengurangi biaya operasional.

1.3.2 Sistem Kontrol dalam Otomasi Industri

Perkembangan teknologi digital telah menjadikan sistem kontrol sebagai bagian penting dari otomasi industri. Sistem kontrol modern umumnya memanfaatkan perangkat elektronik, sensor, aktuator, serta komputer untuk mengelola berbagai proses secara otomatis. Integrasi komponen tersebut memungkinkan proses produksi berlangsung dengan intervensi manusia yang minimal.

Salah satu perangkat yang banyak digunakan dalam industri adalah *Programmable Logic Controller* (PLC). Perangkat ini berfungsi mengendalikan mesin dan proses industri berdasarkan program yang telah dirancang sebelumnya. Selain PLC, terdapat pula sistem *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) yang digunakan untuk memantau dan mengendalikan proses industri secara terpusat.

Penerapan sistem kontrol dalam otomasi memberikan berbagai manfaat, seperti peningkatan produktivitas, pengurangan kesalahan operasional, serta kemampuan pemantauan proses secara real time. Selain itu, integrasi sistem kontrol dengan teknologi digital memungkinkan pengumpulan dan analisis data secara berkelanjutan sehingga pengambilan keputusan dapat dilakukan dengan lebih cepat dan akurat (Lee et al., 2023).

1.3.3 Kontribusi Sistem Kontrol terhadap Industri Modern

Dalam industri modern, sistem kontrol tidak hanya berfungsi sebagai alat pengendali proses, tetapi juga sebagai pendukung transformasi digital dan implementasi konsep *Industry 4.0*. Melalui integrasi dengan sensor cerdas, jaringan komunikasi, dan sistem analitik, sistem kontrol mampu menghasilkan informasi yang berguna untuk meningkatkan efisiensi dan kualitas produksi.

Penggunaan sistem kontrol yang terintegrasi memungkinkan perusahaan melakukan pemantauan kondisi peralatan secara berkelanjutan. Informasi tersebut dapat digunakan untuk mendeteksi potensi gangguan sejak dini sehingga tindakan perawatan dapat dilakukan sebelum terjadi kerusakan yang lebih serius. Pendekatan

ini dikenal sebagai *predictive maintenance* dan menjadi salah satu strategi penting dalam meningkatkan keandalan sistem industri.

Selain meningkatkan produktivitas, sistem kontrol juga berkontribusi terhadap aspek keselamatan kerja. Berbagai parameter penting, seperti tekanan, temperatur, dan kecepatan operasi, dapat dipantau secara otomatis untuk mencegah terjadinya kondisi yang berpotensi membahayakan pekerja maupun fasilitas industri. Dengan demikian, sistem kontrol berperan penting dalam menciptakan lingkungan kerja yang lebih aman dan efisien (Qin et al., 2024).

Secara keseluruhan, sistem kontrol memiliki peran yang sangat penting dalam sistem industri modern. Fungsi pengendalian proses, dukungan terhadap otomasi industri, serta kontribusinya dalam meningkatkan efisiensi, kualitas, dan keselamatan menjadikan sistem kontrol sebagai elemen utama dalam pengembangan industri masa kini. Seiring dengan kemajuan teknologi digital, peran sistem kontrol diperkirakan akan semakin strategis dalam mendukung transformasi industri menuju sistem yang lebih cerdas, terintegrasi, dan berkelanjutan.

1.4 Integrasi Sistem Industri

1.4.1 Pengertian Integrasi Sistem Industri

Integrasi sistem industri merupakan proses penggabungan berbagai komponen, teknologi, sumber daya, dan aktivitas dalam suatu sistem produksi agar dapat bekerja secara terkoordinasi dan

efisien. Dalam industri modern, integrasi tidak hanya mencakup hubungan antarperalatan produksi, tetapi juga melibatkan integrasi data, informasi, manusia, serta proses bisnis yang mendukung keseluruhan aktivitas perusahaan. Tujuan utama integrasi sistem industri adalah menciptakan aliran kerja yang terhubung sehingga setiap bagian dalam organisasi dapat beroperasi secara sinkron dan produktif.

Perkembangan teknologi digital telah mendorong penerapan integrasi sistem yang semakin luas di berbagai sektor industri. Melalui integrasi yang baik, informasi dapat mengalir secara cepat dan akurat dari satu bagian ke bagian lainnya sehingga pengambilan keputusan dapat dilakukan secara lebih efektif. Selain itu, integrasi sistem memungkinkan perusahaan untuk mengurangi duplikasi pekerjaan, meningkatkan koordinasi antarbagian, serta mempercepat respons terhadap perubahan kebutuhan pasar.

Dalam konteks industri modern, integrasi sistem menjadi salah satu faktor penting yang menentukan daya saing perusahaan. Organisasi yang mampu mengintegrasikan berbagai sumber daya secara efektif cenderung memiliki tingkat produktivitas yang lebih tinggi dibandingkan perusahaan yang masih mengelola setiap fungsi secara terpisah.

1.4.2 Komponen Integrasi Sistem Industri

Integrasi sistem industri melibatkan berbagai komponen yang saling berhubungan dalam mendukung kegiatan operasional perusahaan. Salah satu komponen utama adalah integrasi proses produksi yang bertujuan menyelaraskan seluruh tahapan produksi

mulai dari perencanaan, pengadaan bahan baku, proses manufaktur, hingga distribusi produk kepada konsumen.

Komponen berikutnya adalah integrasi informasi melalui pemanfaatan teknologi digital. Sistem informasi yang terintegrasi memungkinkan data dari berbagai departemen, seperti produksi, pemasaran, keuangan, dan logistik, dapat diakses secara real-time. Kondisi ini membantu perusahaan dalam meningkatkan akurasi informasi dan mempercepat proses pengambilan keputusan.

Selain itu, integrasi juga mencakup hubungan antara manusia dan teknologi. Karyawan, operator, serta manajer perlu bekerja sama dengan sistem digital yang digunakan perusahaan agar tujuan organisasi dapat tercapai secara optimal. Oleh karena itu, keberhasilan integrasi sistem industri tidak hanya bergantung pada teknologi yang digunakan, tetapi juga pada kemampuan sumber daya manusia dalam mengoperasikan dan memanfaatkan teknologi tersebut secara efektif.

1.4.3 Teknologi Pendukung Integrasi Sistem Industri

Perkembangan teknologi menjadi faktor utama yang mendorong terwujudnya integrasi sistem industri. Berbagai teknologi modern telah dikembangkan untuk menghubungkan proses produksi, pengelolaan data, dan aktivitas bisnis dalam satu sistem yang terintegrasi. Salah satu teknologi yang banyak digunakan adalah *Enterprise Resource Planning (ERP)*, yaitu sistem yang mengintegrasikan berbagai fungsi bisnis ke dalam satu platform informasi terpadu.

Selain *ERP*, teknologi *Internet of Things (IoT)* juga memiliki peran penting dalam integrasi sistem industri. Teknologi ini memungkinkan berbagai mesin, sensor, dan perangkat produksi saling terhubung melalui jaringan komunikasi sehingga data operasional dapat dipantau secara langsung. Dengan adanya *IoT*, perusahaan dapat meningkatkan efisiensi produksi, mengurangi waktu henti mesin, serta melakukan pemeliharaan secara lebih efektif.

Teknologi lain yang mendukung integrasi sistem industri meliputi *Artificial Intelligence (AI)*, *Big Data Analytics*, dan *Cloud Computing*. Kombinasi berbagai teknologi tersebut memungkinkan perusahaan mengelola informasi dalam jumlah besar, melakukan analisis secara cepat, serta meningkatkan kualitas pengambilan keputusan berdasarkan data yang akurat dan terintegrasi.

1.4.4 Manfaat Integrasi Sistem Industri

Penerapan integrasi sistem industri memberikan berbagai manfaat bagi perusahaan dalam menghadapi persaingan global yang semakin ketat. Salah satu manfaat utama adalah peningkatan efisiensi operasional melalui pengurangan aktivitas yang tidak memberikan nilai tambah serta optimalisasi penggunaan sumber daya. Dengan sistem yang terintegrasi, proses kerja dapat berlangsung lebih cepat dan terkoordinasi.

Integrasi sistem juga meningkatkan kualitas pengendalian dan pengawasan terhadap aktivitas perusahaan. Data yang tersimpan dalam sistem terintegrasi memungkinkan manajemen memantau kinerja operasional secara real-time sehingga berbagai masalah

dapat segera diidentifikasi dan ditangani. Selain itu, integrasi membantu meningkatkan kualitas produk dan layanan karena setiap proses dapat dikendalikan dengan lebih baik.

Manfaat lainnya adalah meningkatnya fleksibilitas perusahaan dalam menghadapi perubahan lingkungan bisnis. Organisasi yang memiliki sistem terintegrasi dapat lebih cepat beradaptasi terhadap perubahan permintaan pasar, perkembangan teknologi, maupun dinamika persaingan industri. Menurut Groover (2023), integrasi sistem manufaktur dan informasi merupakan salah satu elemen penting dalam mewujudkan efisiensi, produktivitas, dan daya saing industri modern.

Melalui penerapan integrasi sistem industri yang efektif, perusahaan dapat menciptakan operasi yang lebih efisien, meningkatkan kualitas pengambilan keputusan, serta memperkuat posisinya dalam menghadapi tantangan industri di era digital.

1.5 Keselamatan Kerja Industri

Keselamatan kerja industri merupakan salah satu aspek penting dalam sistem industri modern yang bertujuan untuk melindungi tenaga kerja, aset perusahaan, serta lingkungan kerja dari berbagai potensi bahaya. Dalam kegiatan industri, penggunaan mesin, peralatan berat, bahan kimia, dan teknologi produksi yang kompleks dapat menimbulkan risiko kecelakaan apabila tidak dikelola dengan baik. Oleh karena itu, penerapan keselamatan kerja menjadi kebutuhan mendasar yang harus diintegrasikan ke dalam

seluruh proses operasional perusahaan. Selain berfungsi untuk mencegah kecelakaan dan penyakit akibat kerja, keselamatan kerja juga berkontribusi terhadap peningkatan produktivitas, efisiensi, serta keberlanjutan organisasi.

1.5.1 Konsep dan Tujuan Keselamatan Kerja

Keselamatan kerja merupakan serangkaian upaya yang dirancang untuk menciptakan kondisi kerja yang aman dan sehat bagi seluruh pekerja. Upaya tersebut meliputi identifikasi bahaya, penilaian risiko, penerapan langkah pengendalian, serta pengawasan terhadap pelaksanaan prosedur kerja yang telah ditetapkan. Dalam lingkungan industri modern, keselamatan kerja tidak hanya berfokus pada pencegahan kecelakaan, tetapi juga mencakup pengelolaan risiko secara menyeluruh agar aktivitas produksi dapat berjalan secara efektif dan berkelanjutan.

Tujuan utama keselamatan kerja adalah mengurangi kemungkinan terjadinya kecelakaan, cedera, maupun gangguan kesehatan yang dapat dialami pekerja selama menjalankan tugasnya. Selain itu, keselamatan kerja bertujuan melindungi fasilitas produksi dari kerusakan yang dapat menyebabkan kerugian finansial bagi perusahaan. Lingkungan kerja yang aman akan memberikan rasa nyaman kepada pekerja sehingga dapat meningkatkan motivasi, konsentrasi, dan kinerja mereka. Dengan demikian, keselamatan kerja menjadi salah satu faktor yang mendukung tercapainya tujuan organisasi secara optimal.

1.5.2 Faktor-Faktor Penyebab Kecelakaan Kerja

Kecelakaan kerja umumnya terjadi akibat kombinasi berbagai faktor yang saling memengaruhi. Salah satu faktor utama adalah faktor manusia (*human factor*), seperti kurangnya pengetahuan mengenai prosedur keselamatan, kelalaian dalam bekerja, kelelahan, serta rendahnya tingkat kepatuhan terhadap aturan yang berlaku. Kesalahan manusia sering kali menjadi penyebab dominan dalam berbagai insiden kerja, terutama pada lingkungan industri yang memiliki tingkat risiko tinggi.

Selain faktor manusia, faktor teknis juga berperan penting dalam terjadinya kecelakaan kerja. Faktor ini meliputi kerusakan mesin, kegagalan sistem operasi, penggunaan peralatan yang tidak sesuai standar, serta kurangnya pemeliharaan fasilitas produksi. Peralatan yang tidak berfungsi dengan baik dapat meningkatkan potensi terjadinya kecelakaan yang berdampak pada pekerja maupun proses produksi.

Faktor lingkungan kerja juga perlu diperhatikan karena dapat memengaruhi tingkat keselamatan pekerja. Lingkungan yang memiliki pencahayaan kurang memadai, tingkat kebisingan tinggi, suhu ekstrem, atau tata letak fasilitas yang tidak ergonomis dapat meningkatkan risiko terjadinya kecelakaan. Oleh karena itu, perusahaan perlu melakukan identifikasi dan pengendalian risiko secara berkala untuk memastikan kondisi kerja tetap aman dan mendukung produktivitas pekerja. Pengelolaan risiko yang sistematis merupakan bagian penting dari upaya peningkatan

keselamatan dan kesehatan kerja di berbagai sektor industri (Liu et al., 2023).

1.5.3 Penerapan Keselamatan Kerja dalam Industri Modern

Penerapan keselamatan kerja dalam industri modern memerlukan komitmen dari seluruh unsur organisasi, mulai dari manajemen hingga pekerja. Salah satu langkah yang dapat dilakukan adalah memberikan pelatihan keselamatan secara berkala agar pekerja memahami potensi bahaya serta cara bekerja yang aman. Pelatihan tersebut mencakup penggunaan alat pelindung diri, prosedur tanggap darurat, serta penerapan standar operasional yang sesuai dengan ketentuan keselamatan kerja.

Selain pelatihan, perusahaan perlu membangun budaya keselamatan yang menempatkan keselamatan sebagai prioritas utama dalam setiap aktivitas kerja. Budaya keselamatan yang kuat dapat mendorong pekerja untuk lebih disiplin dalam mematuhi prosedur dan aktif melaporkan potensi bahaya yang ditemukan di lingkungan kerja. Penerapan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (*Occupational Safety and Health Management System*) juga menjadi pendekatan yang banyak digunakan untuk memastikan bahwa seluruh aspek keselamatan dikelola secara terstruktur dan berkelanjutan (Fitrijaningsih et al., 2023).

Melalui penerapan keselamatan kerja yang efektif, perusahaan dapat mengurangi risiko kecelakaan, meningkatkan kesejahteraan pekerja, serta menciptakan lingkungan kerja yang lebih produktif. Dengan demikian, keselamatan kerja tidak hanya berfungsi sebagai alat perlindungan, tetapi juga menjadi bagian

penting dalam mendukung keberhasilan operasional dan daya saing industri modern.

Bab 2: Keselamatan Kelistrikan Industri

Ir. Bernardinus Sri Widodo, M.Eng.

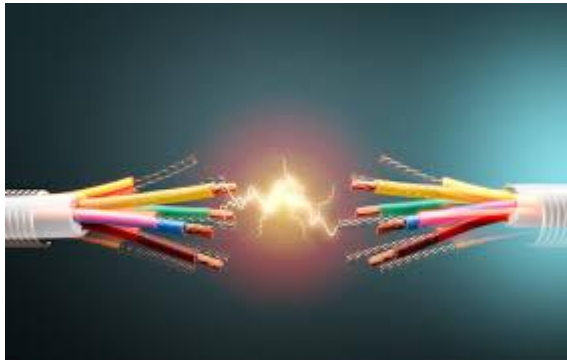
2.1 Bahaya Listrik

Listrik merupakan sumber energi yang sangat penting dalam dunia industri modern karena mendukung berbagai aktivitas operasional, mulai dari pengoperasian mesin produksi hingga sistem otomatisasi. Meskipun memberikan banyak manfaat, penggunaan listrik juga memiliki potensi bahaya yang dapat menyebabkan kecelakaan kerja, kerusakan peralatan, bahkan korban jiwa apabila tidak dikelola dengan baik. Oleh karena itu, pemahaman mengenai bahaya listrik menjadi aspek penting dalam penerapan sistem keselamatan dan kesehatan kerja di lingkungan industri.

Bahaya listrik dapat muncul akibat berbagai faktor, seperti instalasi yang tidak sesuai standar, penggunaan peralatan yang rusak, kesalahan prosedur kerja, maupun kurangnya kesadaran pekerja terhadap risiko kelistrikan. Dalam lingkungan industri yang umumnya menggunakan daya listrik besar dan peralatan bertegangan tinggi, risiko kecelakaan akibat listrik menjadi lebih tinggi dibandingkan lingkungan kerja biasa. Oleh sebab itu, identifikasi dan pengendalian bahaya listrik harus menjadi bagian integral dari sistem manajemen keselamatan industri.

2.1.1 Pengertian dan Sumber Bahaya Listrik

Bahaya listrik adalah segala kondisi yang berpotensi menimbulkan cedera, kerusakan peralatan, kebakaran, atau gangguan operasional akibat penggunaan energi listrik. Bahaya ini dapat berasal dari kontak langsung maupun tidak langsung dengan bagian yang bertegangan serta berbagai kondisi teknis yang tidak aman dalam sistem kelistrikan.



Gambar 2.1. listrik yang masih bertegangan

Sumber: <https://share.google/03UarLYgvVS1nImay>

Salah satu sumber bahaya listrik yang paling umum adalah kontak langsung dengan penghantar listrik yang masih bertegangan. Kontak ini dapat terjadi ketika seseorang menyentuh kabel terbuka, terminal listrik, atau komponen peralatan yang tidak memiliki pelindung yang memadai. Arus listrik yang mengalir melalui tubuh manusia dapat menyebabkan gangguan fungsi organ, luka bakar, bahkan kematian tergantung pada besar arus dan lamanya paparan.

Selain kontak langsung, kontak tidak langsung juga merupakan sumber bahaya yang sering terjadi. Kondisi ini terjadi

ketika seseorang menyentuh bagian logam dari suatu peralatan yang secara normal tidak bertegangan, tetapi menjadi bertegangan akibat kerusakan isolasi atau kegagalan sistem proteksi. Oleh karena itu, sistem pembumian (*grounding*) yang baik sangat diperlukan untuk mengurangi risiko kecelakaan akibat kontak tidak langsung.

Bahaya listrik juga dapat muncul akibat hubungan singkat (*short circuit*), kelebihan beban (*overload*), dan kerusakan komponen instalasi listrik. Kondisi tersebut dapat menghasilkan panas berlebih yang berpotensi menyebabkan kebakaran maupun kerusakan pada sistem distribusi tenaga listrik. Menurut Occupational Safety and Health Administration (2024), sebagian besar kecelakaan listrik di lingkungan kerja disebabkan oleh kegagalan dalam mengidentifikasi dan mengendalikan sumber bahaya yang telah ada sebelumnya.

2.1.2 Jenis-Jenis Bahaya Listrik di Industri

Terdapat beberapa jenis bahaya listrik yang umum ditemukan dalam lingkungan industri. Salah satu yang paling berbahaya adalah sengatan listrik (*electric shock*). Sengatan listrik terjadi ketika arus listrik mengalir melalui tubuh manusia akibat kontak dengan sumber tegangan. Dampaknya dapat berupa kejang otot, kehilangan kesadaran, gangguan pernapasan, hingga henti jantung.

Bahaya berikutnya adalah luka bakar listrik (*electrical burn*). Luka bakar dapat terjadi akibat aliran arus listrik yang melewati jaringan tubuh atau karena paparan panas yang dihasilkan oleh percikan listrik. Luka bakar jenis ini sering kali lebih serius

dibandingkan luka bakar biasa karena dapat merusak jaringan tubuh hingga lapisan yang lebih dalam.

Jenis bahaya lainnya adalah *arc flash*, yaitu pelepasan energi listrik dalam bentuk cahaya, panas, dan tekanan yang sangat tinggi akibat terjadinya gangguan pada sistem kelistrikan. Fenomena ini mampu menghasilkan temperatur yang sangat tinggi dalam waktu singkat sehingga dapat menyebabkan luka bakar serius, kerusakan penglihatan, serta cedera akibat gelombang tekanan yang ditimbulkan.

Selain itu, terdapat risiko kebakaran dan ledakan yang disebabkan oleh instalasi listrik yang tidak aman. Hubungan singkat, kabel yang rusak, maupun penggunaan peralatan yang melebihi kapasitas dapat memicu percikan api yang kemudian berkembang menjadi kebakaran. Dalam lingkungan industri yang menyimpan bahan mudah terbakar, risiko ini menjadi semakin besar dan memerlukan perhatian khusus.

Gangguan terhadap operasional produksi juga termasuk dampak dari bahaya listrik. Kerusakan sistem kelistrikan dapat menyebabkan penghentian proses produksi, kerugian ekonomi, serta gangguan terhadap kualitas produk yang dihasilkan. Oleh karena itu, pengelolaan risiko listrik tidak hanya berkaitan dengan keselamatan pekerja, tetapi juga dengan keberlangsungan operasional perusahaan.

2.1.3 Upaya Pencegahan Bahaya Listrik

Pencegahan bahaya listrik merupakan langkah penting untuk menciptakan lingkungan kerja yang aman dan produktif. Salah satu upaya utama adalah memastikan bahwa seluruh instalasi listrik dirancang dan dipasang sesuai standar yang berlaku. Penggunaan komponen berkualitas serta penerapan sistem proteksi yang memadai dapat membantu mengurangi risiko kecelakaan akibat gangguan kelistrikan.

Pemeriksaan dan pemeliharaan rutin terhadap peralatan listrik juga sangat diperlukan. Kabel, panel distribusi, motor listrik, dan perangkat lainnya harus diperiksa secara berkala untuk mendeteksi adanya kerusakan atau penurunan kualitas yang dapat menimbulkan bahaya. Tindakan perbaikan harus segera dilakukan apabila ditemukan kondisi yang tidak aman.

Penggunaan alat pelindung diri (*personal protective equipment* atau *PPE*) menjadi langkah penting dalam melindungi pekerja yang berhubungan langsung dengan sistem kelistrikan. Sarung tangan isolasi, sepatu keselamatan, pelindung wajah, dan pakaian tahan *arc flash* dapat mengurangi risiko cedera ketika terjadi kecelakaan listrik.

Pelatihan keselamatan kerja juga memiliki peran yang sangat penting dalam pencegahan bahaya listrik. Pekerja harus memahami prosedur kerja yang aman, cara menggunakan peralatan listrik dengan benar, serta langkah-langkah darurat yang harus dilakukan apabila terjadi kecelakaan. Kesadaran dan kompetensi pekerja

merupakan faktor utama dalam menciptakan budaya keselamatan di lingkungan industri.

Menurut International Labour Organization (2023), penerapan sistem keselamatan kelistrikan yang terintegrasi, didukung oleh pelatihan yang memadai dan pengawasan yang konsisten, mampu menurunkan tingkat kecelakaan kerja secara signifikan. Oleh karena itu, pengendalian bahaya listrik harus menjadi prioritas utama dalam setiap aktivitas industri yang melibatkan penggunaan energi listrik.

Dengan memahami sumber, jenis, dan metode pencegahan bahaya listrik, perusahaan dapat menciptakan lingkungan kerja yang lebih aman serta meningkatkan keandalan sistem kelistrikan yang digunakan. Upaya tersebut tidak hanya melindungi pekerja dari risiko kecelakaan, tetapi juga mendukung kelangsungan operasional dan produktivitas industri secara berkelanjutan.

2.2 LOTO (Lockout Tagout)

Keselamatan kerja merupakan aspek yang sangat penting dalam lingkungan industri, terutama pada sistem kelistrikan yang memiliki potensi bahaya tinggi. Aktivitas pemeliharaan, perbaikan, inspeksi, maupun penggantian komponen listrik sering kali mengharuskan pekerja berinteraksi langsung dengan sumber energi yang berbahaya. Apabila sumber energi tersebut tidak dikendalikan dengan baik, maka risiko kecelakaan seperti sengatan listrik,

kebakaran, ledakan, maupun cedera akibat pergerakan mesin dapat meningkat secara signifikan.

Salah satu metode yang banyak diterapkan untuk mengendalikan risiko tersebut adalah *Lockout Tagout* (LOTO). LOTO merupakan prosedur keselamatan yang digunakan untuk memastikan bahwa mesin, peralatan, atau sistem energi berada dalam kondisi aman dan tidak dapat dioperasikan secara tidak sengaja selama proses pemeliharaan atau perbaikan berlangsung. Penerapan LOTO bertujuan melindungi pekerja dari bahaya yang berasal dari energi listrik, mekanik, hidrolik, pneumatik, termal, maupun sumber energi lainnya yang tersimpan dalam suatu sistem.

Dalam industri modern, prosedur LOTO menjadi bagian penting dari program keselamatan dan kesehatan kerja karena mampu mengurangi risiko kecelakaan yang disebabkan oleh pelepasan energi yang tidak terkendali. Oleh karena itu, pemahaman mengenai konsep, prosedur, dan manfaat LOTO sangat diperlukan untuk menciptakan lingkungan kerja yang aman dan produktif.

2.2.1 Pengertian dan Prinsip Dasar LOTO

Lockout Tagout merupakan prosedur pengamanan yang dilakukan dengan mengisolasi sumber energi menggunakan perangkat pengunci (*lockout*) dan memberikan tanda peringatan (*tagout*) pada titik isolasi energi. Tujuan utama prosedur ini adalah mencegah pengoperasian peralatan secara tidak sengaja selama pekerjaan pemeliharaan atau perbaikan sedang dilakukan.



Gambar 2.2. Perangkat lockout

Sumber: <https://share.google/GsvF8WceNPWDsX6GY>

Perangkat *lockout* biasanya berupa gembok khusus yang dipasang pada sakelar, pemutus arus (*circuit breaker*), katup, atau perangkat isolasi energi lainnya. Dengan adanya penguncian tersebut, tidak ada pihak yang dapat mengaktifkan kembali peralatan tanpa izin dari pekerja yang memasang kunci. Sementara itu, *tagout* berupa label atau tanda peringatan yang berisi informasi mengenai identitas pekerja, waktu pemasangan, serta larangan mengoperasikan peralatan yang sedang dalam kondisi terkunci.

Prinsip dasar LOTO adalah memastikan seluruh sumber energi telah diisolasi sebelum pekerjaan dimulai. Selain energi listrik, sumber energi lain seperti tekanan fluida, energi pegas, energi gravitasi, dan energi panas juga harus diperhatikan karena dapat menimbulkan bahaya apabila tidak dikendalikan dengan benar. Oleh sebab itu, prosedur LOTO tidak hanya berfokus pada pemutusan sumber listrik, tetapi juga mencakup pengendalian seluruh bentuk energi yang berpotensi membahayakan pekerja.

Penerapan prinsip ini memberikan jaminan bahwa peralatan tidak akan aktif secara tiba-tiba selama proses pekerjaan berlangsung. Dengan demikian, risiko cedera akibat kontak dengan bagian yang bergerak atau bertegangan dapat diminimalkan secara efektif.

2.2.2 Prosedur Pelaksanaan LOTO

Pelaksanaan LOTO harus dilakukan secara sistematis dan mengikuti prosedur yang telah ditetapkan oleh perusahaan maupun standar keselamatan yang berlaku. Langkah pertama adalah melakukan identifikasi terhadap seluruh sumber energi yang terhubung dengan peralatan yang akan dikerjakan. Identifikasi ini penting untuk memastikan tidak ada sumber energi yang terlewat selama proses pengamanan.

Setelah sumber energi diidentifikasi, langkah berikutnya adalah menghentikan operasi peralatan sesuai prosedur normal. Peralatan kemudian diisolasi dari seluruh sumber energinya menggunakan perangkat pemutus atau katup yang tersedia. Setelah proses isolasi dilakukan, perangkat *lockout* dipasang pada titik isolasi untuk mencegah pengaktifan kembali secara tidak sengaja.

Selanjutnya, label *tagout* dipasang sebagai tanda peringatan bahwa peralatan sedang dalam proses pemeliharaan. Informasi pada label harus jelas dan mudah dibaca agar seluruh pekerja mengetahui status peralatan tersebut. Setelah pemasangan kunci dan label selesai, dilakukan pelepasan atau pengosongan energi tersimpan (*stored energy*), seperti tekanan udara, tekanan hidrolik, atau energi mekanik yang masih berada dalam sistem.

Tahap berikutnya adalah melakukan verifikasi untuk memastikan bahwa isolasi energi telah berhasil dilakukan. Verifikasi dapat dilakukan dengan mencoba menghidupkan peralatan tanpa melepaskan kunci pengaman. Jika peralatan tidak dapat beroperasi, maka pekerjaan pemeliharaan dapat dimulai dengan aman.

Setelah pekerjaan selesai, seluruh peralatan dan area kerja diperiksa kembali untuk memastikan kondisi aman. Kunci dan label hanya boleh dilepas oleh pekerja yang memasangnya atau pihak yang berwenang sesuai prosedur perusahaan. Setelah seluruh perangkat pengaman dilepas, peralatan dapat diaktifkan kembali secara bertahap sesuai prosedur operasional yang berlaku.

2.2.3 Manfaat dan Pentingnya Penerapan LOTO

Penerapan LOTO memberikan berbagai manfaat dalam upaya meningkatkan keselamatan kerja di lingkungan industri. Manfaat utama dari prosedur ini adalah mencegah terjadinya kecelakaan akibat pelepasan energi yang tidak terkendali. Dengan memastikan bahwa sumber energi telah diisolasi secara sempurna, risiko sengatan listrik, cedera mekanis, maupun kecelakaan lainnya dapat dikurangi secara signifikan.

Selain melindungi pekerja, LOTO juga membantu meningkatkan keandalan proses pemeliharaan. Peralatan yang berada dalam kondisi aman memungkinkan teknisi bekerja dengan lebih fokus dan efektif tanpa khawatir terhadap potensi bahaya yang berasal dari sistem energi. Kondisi ini dapat meningkatkan kualitas pekerjaan sekaligus mengurangi kemungkinan terjadinya kesalahan selama proses perbaikan.

Penerapan LOTO juga mendukung kepatuhan terhadap regulasi dan standar keselamatan kerja. Banyak standar internasional dan nasional mensyaratkan penggunaan prosedur pengendalian energi berbahaya sebagai bagian dari sistem manajemen keselamatan kerja. Oleh karena itu, penerapan LOTO tidak hanya memberikan manfaat teknis, tetapi juga membantu perusahaan memenuhi kewajiban hukum dan meningkatkan budaya keselamatan di lingkungan kerja.

Di era industri modern, penerapan LOTO semakin diperkuat melalui integrasi dengan sistem digital dan manajemen keselamatan berbasis teknologi. Penggunaan sistem dokumentasi elektronik, identifikasi pekerja berbasis digital, serta pemantauan prosedur secara real-time memungkinkan pelaksanaan LOTO menjadi lebih efektif dan terdokumentasi dengan baik. Menurut Occupational Safety and Health Administration (2024), program pengendalian energi berbahaya yang diterapkan secara konsisten mampu mencegah ribuan kecelakaan kerja setiap tahunnya dan menjadi salah satu elemen utama dalam sistem keselamatan industri.

Secara keseluruhan, LOTO (*Lockout Tagout*) merupakan prosedur keselamatan yang sangat penting dalam pengendalian energi berbahaya pada lingkungan industri. Melalui proses isolasi, penguncian, dan pemberian tanda peringatan, prosedur ini mampu melindungi pekerja dari berbagai risiko yang berkaitan dengan sumber energi listrik maupun energi lainnya. Dengan penerapan yang disiplin dan sesuai prosedur, LOTO dapat meningkatkan

keselamatan kerja, mendukung efektivitas pemeliharaan, serta memperkuat budaya keselamatan dalam sistem industri modern.

Berikut pengembangan subbab sesuai format yang Anda tetapkan.

2.3 Grounding

Grounding atau pbumian merupakan salah satu sistem pengamanan yang sangat penting dalam instalasi kelistrikan industri. Sistem ini berfungsi untuk menghubungkan bagian tertentu dari peralatan listrik ke bumi melalui penghantar yang memiliki hambatan rendah. Tujuan utama *grounding* adalah memberikan jalur aman bagi arus gangguan sehingga dapat mencegah terjadinya sengatan listrik, kerusakan peralatan, maupun kebakaran akibat gangguan kelistrikan.

Dalam lingkungan industri, penggunaan peralatan listrik dengan daya besar serta kompleksitas sistem distribusi energi menyebabkan risiko bahaya listrik menjadi lebih tinggi dibandingkan instalasi rumah tangga. Oleh karena itu, penerapan sistem *grounding* yang baik menjadi salah satu persyaratan utama dalam menjaga keselamatan pekerja dan menjamin keandalan operasi peralatan listrik. Sistem pbumian yang dirancang sesuai standar mampu mengurangi risiko kecelakaan kerja sekaligus meningkatkan kualitas dan stabilitas sistem tenaga listrik.

2.3.1 Fungsi dan Tujuan *Grounding*

Fungsi utama *grounding* adalah menyediakan jalur dengan impedansi rendah untuk mengalirkan arus gangguan ke tanah. Ketika terjadi kebocoran arus atau hubungan singkat pada peralatan listrik, arus tersebut akan dialirkan melalui sistem pembumian sehingga tidak mengalir melalui tubuh manusia atau bagian lain yang dapat menimbulkan bahaya.



Gambar 2.3. Grounding

Sumber: <https://share.google/UuL18lMTsezw2vFKI>

Selain melindungi manusia dari sengatan listrik, sistem *grounding* juga berfungsi melindungi peralatan listrik dari kerusakan akibat tegangan lebih (*overvoltage*), sambaran petir, maupun gangguan sistem tenaga. Dengan adanya jalur pembumian yang baik, energi gangguan dapat disalurkan ke bumi sehingga mengurangi kemungkinan kerusakan pada komponen elektronik dan peralatan industri.

Fungsi lainnya adalah menjaga kestabilan tegangan dalam sistem distribusi listrik. Pada beberapa sistem tenaga, titik netral transformator dihubungkan ke bumi untuk menjaga referensi tegangan tetap stabil. Kondisi ini membantu meningkatkan keandalan operasi sistem dan mempermudah proses deteksi gangguan ketika terjadi kerusakan pada jaringan listrik.

2.3.2 Jenis-Jenis Sistem *Grounding*

Dalam instalasi industri, terdapat beberapa jenis sistem *grounding* yang digunakan sesuai dengan kebutuhan dan karakteristik sistem tenaga listrik. Salah satu jenis yang umum digunakan adalah *equipment grounding*, yaitu sistem pembumian yang diterapkan pada rangka atau bagian logam peralatan listrik yang tidak berarus selama kondisi normal. Sistem ini bertujuan melindungi pekerja dari bahaya tegangan sentuh apabila terjadi kebocoran arus.

Jenis berikutnya adalah *system grounding*, yaitu pembumian yang dilakukan pada salah satu titik sistem tenaga, biasanya titik netral transformator atau generator. Pembumian ini bertujuan menjaga kestabilan tegangan sistem serta membatasi besarnya tegangan lebih yang dapat muncul akibat gangguan.

Selain itu, terdapat *lightning grounding* yang digunakan sebagai bagian dari sistem proteksi petir. Sistem ini berfungsi menyalurkan arus petir ke bumi melalui jalur yang aman sehingga melindungi bangunan, instalasi, dan peralatan dari kerusakan akibat sambaran petir.

Pemilihan jenis pembumian harus mempertimbangkan kondisi lingkungan, kapasitas sistem listrik, tingkat risiko, serta standar keselamatan yang berlaku. Dengan penerapan sistem yang tepat, tingkat keamanan instalasi dapat ditingkatkan secara signifikan.

2.3.3 Standar dan Pemeliharaan Sistem *Grounding*

Keandalan sistem *grounding* sangat dipengaruhi oleh kualitas desain, pemasangan, dan pemeliharannya. Oleh karena itu, berbagai standar internasional telah menetapkan persyaratan teknis terkait sistem pembumian, seperti IEC (*International Electrotechnical Commission*), IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), dan NFPA (*National Fire Protection Association*). Standar tersebut mengatur nilai tahanan pembumian, metode pengujian, spesifikasi penghantar, serta prosedur keselamatan yang harus dipenuhi.

Salah satu parameter penting dalam sistem pembumian adalah nilai tahanan tanah. Semakin kecil nilai tahanan pembumian, semakin baik kemampuan sistem dalam mengalirkan arus gangguan ke bumi. Oleh karena itu, pengukuran tahanan pembumian perlu dilakukan secara berkala untuk memastikan sistem tetap bekerja sesuai spesifikasi yang ditetapkan.

Pemeliharaan sistem *grounding* juga mencakup inspeksi terhadap kondisi elektroda tanah, sambungan penghantar, serta perlindungan terhadap korosi yang dapat menurunkan kinerja sistem. Seiring waktu, perubahan kondisi tanah dan lingkungan dapat memengaruhi efektivitas pembumian sehingga diperlukan

evaluasi dan perbaikan secara berkala. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa pemantauan sistem pembumian secara berkelanjutan dapat meningkatkan keselamatan instalasi dan mengurangi risiko kegagalan sistem tenaga listrik (Grcev & Dawalibi, 2023).

Secara keseluruhan, *grounding* merupakan komponen fundamental dalam keselamatan kelistrikan industri. Fungsi perlindungan terhadap manusia, peralatan, dan sistem tenaga menjadikan pembumian sebagai bagian yang tidak terpisahkan dari instalasi listrik modern. Dengan penerapan sistem *grounding* yang sesuai standar serta didukung pemeliharaan yang baik, tingkat keselamatan dan keandalan operasi industri dapat ditingkatkan secara optimal.

2.4 PPE (Personal Protective Equipment)

2.4.1 Pengertian PPE dalam Keselamatan Kelistrikan Industri

Personal Protective Equipment (PPE) atau Alat Pelindung Diri (APD) merupakan perlengkapan yang digunakan oleh pekerja untuk melindungi diri dari potensi bahaya yang dapat menyebabkan cedera, gangguan kesehatan, maupun kecelakaan kerja. Dalam lingkungan kelistrikan industri, penggunaan PPE memiliki peran yang sangat penting karena pekerja sering berhadapan dengan risiko sengatan listrik, busur api (*arc flash*), ledakan listrik, panas berlebih, serta bahaya mekanis yang dapat mengancam keselamatan.



Gambar 2.4. PPE (Personal Protective Equipment)

Sumber: <https://share.google/PCbTuj5SZGZganIDh>

PPE berfungsi sebagai lapisan perlindungan terakhir setelah penerapan pengendalian bahaya melalui rekayasa teknik, prosedur kerja, dan pengendalian administratif. Meskipun berbagai sistem pengamanan telah diterapkan, risiko kecelakaan tetap dapat terjadi akibat kesalahan manusia, kegagalan peralatan, maupun kondisi kerja yang tidak terduga. Oleh karena itu, penggunaan PPE menjadi bagian penting dalam sistem manajemen keselamatan dan kesehatan kerja di lingkungan industri.

Penerapan PPE yang tepat tidak hanya bertujuan mengurangi risiko cedera, tetapi juga meningkatkan kesadaran pekerja terhadap pentingnya budaya keselamatan kerja. Dengan perlindungan yang

memadai, pekerja dapat melaksanakan tugasnya secara lebih aman dan produktif.

2.4.2 Jenis-Jenis PPE pada Pekerjaan Kelistrikan

Berbagai jenis PPE digunakan dalam pekerjaan kelistrikan sesuai dengan tingkat risiko yang dihadapi. Salah satu PPE yang paling umum digunakan adalah helm keselamatan (*safety helmet*). Helm berfungsi melindungi kepala dari benturan, benda jatuh, maupun kontak tidak langsung dengan sumber listrik. Helm yang digunakan dalam pekerjaan kelistrikan umumnya memiliki sifat isolasi listrik untuk mengurangi risiko sengatan.

Sarung tangan isolasi listrik juga merupakan PPE yang sangat penting. Sarung tangan ini dibuat dari bahan khusus yang mampu menghambat aliran arus listrik sehingga memberikan perlindungan terhadap kontak langsung dengan konduktor bertegangan. Selain itu, pekerja juga menggunakan sepatu keselamatan (*safety shoes*) yang memiliki sol isolator untuk mengurangi risiko aliran arus listrik melalui tubuh.

Peralatan pelindung lainnya meliputi kacamata keselamatan (*safety glasses*), pelindung wajah (*face shield*), pakaian tahan busur api (*arc-rated clothing*), dan pelindung pendengaran (*hearing protection*). Pemilihan PPE harus disesuaikan dengan jenis pekerjaan, tingkat tegangan listrik, serta potensi bahaya yang terdapat di area kerja.

2.4.3 Pentingnya Penggunaan PPE dalam Industri

Penggunaan PPE merupakan salah satu langkah penting dalam mencegah kecelakaan kerja di lingkungan industri. Risiko kelistrikan dapat menyebabkan cedera serius seperti luka bakar, kerusakan jaringan tubuh, gangguan sistem saraf, hingga kematian. Oleh karena itu, penggunaan PPE yang sesuai standar menjadi kewajiban bagi setiap pekerja yang terlibat dalam aktivitas kelistrikan.

Selain memberikan perlindungan fisik, penggunaan PPE juga mendukung kepatuhan terhadap peraturan keselamatan kerja yang berlaku. Banyak standar nasional maupun internasional mewajibkan perusahaan untuk menyediakan PPE yang sesuai dan memastikan pekerja menggunakannya secara benar selama menjalankan tugas. Kepatuhan terhadap ketentuan tersebut tidak hanya melindungi pekerja, tetapi juga membantu perusahaan mengurangi kerugian akibat kecelakaan kerja.

Penerapan PPE yang konsisten dapat meningkatkan budaya keselamatan dalam organisasi. Ketika pekerja terbiasa menggunakan perlengkapan pelindung sesuai prosedur, kesadaran terhadap risiko kerja akan meningkat sehingga potensi terjadinya kecelakaan dapat ditekan secara signifikan.

2.4.4 Pengelolaan dan Pemeliharaan PPE

Keefektifan PPE tidak hanya bergantung pada pemilihannya, tetapi juga pada pengelolaan dan pemeliharaan yang dilakukan secara berkala. Setiap PPE harus diperiksa sebelum digunakan untuk memastikan tidak terdapat kerusakan yang dapat mengurangi tingkat

perlindungannya. Peralatan yang mengalami kerusakan harus segera diperbaiki atau diganti agar tetap memenuhi standar keselamatan.

Perusahaan juga perlu memberikan pelatihan kepada pekerja mengenai cara penggunaan, penyimpanan, dan perawatan PPE yang benar. Pelatihan ini penting untuk memastikan bahwa setiap pekerja memahami fungsi masing-masing perlengkapan serta mampu menggunakannya secara efektif dalam situasi kerja yang berbeda. Selain itu, inspeksi rutin perlu dilakukan untuk mengevaluasi kondisi PPE dan memastikan seluruh peralatan masih layak digunakan.

Menurut Occupational Safety and Health Administration (OSHA, 2023), penggunaan PPE yang sesuai, disertai pelatihan dan pemeliharaan yang baik, merupakan salah satu langkah penting dalam mengurangi risiko kecelakaan kerja pada lingkungan industri yang memiliki potensi bahaya tinggi. Oleh karena itu, PPE harus menjadi bagian yang tidak terpisahkan dari sistem keselamatan kelistrikan industri guna menciptakan lingkungan kerja yang aman dan produktif.

2.5 Arc Flash

2.5.1 Pengertian *Arc Flash*

Arc flash merupakan fenomena pelepasan energi listrik yang terjadi akibat terbentuknya busur listrik (*electric arc*) antara dua konduktor atau antara konduktor dengan tanah. Peristiwa ini umumnya dipicu oleh kegagalan isolasi, kesalahan operasi,

kontaminasi pada peralatan listrik, maupun kerusakan komponen yang menyebabkan arus listrik mengalir melalui media udara. Ketika busur listrik terbentuk, energi yang tersimpan dalam sistem akan dilepaskan secara tiba-tiba dalam bentuk panas, cahaya, gelombang tekanan, dan percikan logam cair.



Gambar 2.5. Arc Flash pada panel listrik

Sumber: <https://share.google/kQfUai7CdC99zT1TP>

Dalam lingkungan industri, *arc flash* menjadi salah satu bahaya kelistrikan yang paling serius karena dapat terjadi pada berbagai peralatan seperti panel distribusi, *switchgear*, transformator, *motor control center*, dan sistem tenaga listrik lainnya. Besarnya energi yang dilepaskan bergantung pada tingkat tegangan, arus gangguan, serta waktu pemutusan gangguan. Oleh karena itu, pemahaman terhadap karakteristik *arc flash* sangat penting sebagai dasar dalam penerapan sistem keselamatan kelistrikan yang efektif.

2.5.2 Dampak Arc Flash

Dampak utama *arc flash* adalah timbulnya panas dengan suhu yang sangat tinggi dalam waktu yang sangat singkat. Paparan panas tersebut dapat menyebabkan luka bakar serius pada kulit manusia, bahkan tanpa adanya kontak langsung dengan sumber listrik. Selain itu, cahaya yang dihasilkan memiliki intensitas sangat tinggi sehingga berpotensi menyebabkan gangguan penglihatan sementara maupun permanen.

Peristiwa *arc flash* juga menghasilkan gelombang tekanan yang sering disebut sebagai *arc blast*. Gelombang ini dapat menyebabkan pekerja terjatuh, terbentur peralatan di sekitarnya, atau mengalami cedera akibat lontaran material logam yang meleleh. Dalam kasus yang lebih parah, kejadian ini dapat mengakibatkan kerusakan permanen pada organ tubuh hingga kematian.

Selain dampak terhadap pekerja, *arc flash* juga dapat menimbulkan kerusakan pada peralatan listrik dan mengganggu kontinuitas operasi industri. Kerusakan tersebut dapat menyebabkan penghentian proses produksi, peningkatan biaya pemeliharaan, serta menurunkan tingkat keandalan sistem tenaga listrik. Oleh karena itu, pengendalian risiko *arc flash* menjadi bagian penting dalam manajemen keselamatan dan kesehatan kerja di sektor industri.

2.5.3 Faktor Penyebab Arc Flash

Terdapat berbagai faktor yang dapat memicu terjadinya *arc flash* pada instalasi listrik industri. Salah satu penyebab utama adalah kegagalan isolasi akibat penuaan material, kelembapan, debu konduktif, atau kerusakan mekanis. Ketika kemampuan isolasi

menurun, peluang terbentuknya busur listrik akan meningkat secara signifikan.

Faktor lain yang sering menjadi penyebab adalah kesalahan manusia dalam melakukan pekerjaan kelistrikan. Penggunaan peralatan yang tidak sesuai, prosedur kerja yang tidak dipatuhi, serta kurangnya kompetensi teknis dapat meningkatkan risiko terjadinya gangguan listrik. Aktivitas pemeliharaan pada peralatan yang masih bertegangan juga merupakan kondisi yang memiliki tingkat risiko tinggi terhadap terjadinya *arc flash*.

Selain itu, kondisi lingkungan kerja turut memengaruhi kemungkinan terjadinya *arc flash*. Lingkungan yang kotor, lembap, atau memiliki paparan bahan korosif dapat mempercepat degradasi komponen listrik. Oleh sebab itu, inspeksi dan pemeliharaan berkala perlu dilakukan untuk memastikan seluruh peralatan berada dalam kondisi yang aman dan andal.

2.5.4 Pencegahan dan Pengendalian Arc Flash

Pencegahan *arc flash* dapat dilakukan melalui pendekatan teknis dan administratif secara terpadu. Salah satu langkah utama adalah melakukan analisis bahaya *arc flash* untuk menentukan tingkat energi insiden yang mungkin terjadi pada setiap peralatan listrik. Hasil analisis tersebut digunakan sebagai dasar dalam penentuan batas aman kerja, kebutuhan alat pelindung diri, serta penyusunan prosedur keselamatan yang sesuai (NFPA, 2024).

Penggunaan alat pelindung diri (*Personal Protective Equipment* atau PPE) yang memiliki kemampuan menahan energi busur listrik juga menjadi bagian penting dalam pengendalian risiko.

PPE yang umum digunakan meliputi pakaian tahan api, pelindung wajah, sarung tangan isolasi, helm keselamatan, dan perlengkapan pendukung lainnya yang dirancang khusus untuk pekerjaan kelistrikan.

Selain perlindungan teknis, organisasi perlu memastikan bahwa setiap pekerja memperoleh pelatihan keselamatan kelistrikan secara berkala. Pelatihan tersebut mencakup identifikasi bahaya, prosedur kerja aman, penerapan *lockout-tagout*, serta penggunaan PPE yang benar. NFPA 70E menegaskan bahwa pengendalian risiko kelistrikan harus mengutamakan eliminasi bahaya dan penerapan praktik kerja yang aman sebelum mengandalkan penggunaan PPE sebagai lapisan perlindungan terakhir (NFPA, 2024).

Melalui kombinasi antara analisis risiko, pemeliharaan peralatan, penggunaan PPE yang sesuai, dan peningkatan kompetensi pekerja, potensi kecelakaan akibat *arc flash* dapat diminimalkan sehingga keselamatan personel dan keandalan operasi industri dapat terjaga secara optimal.

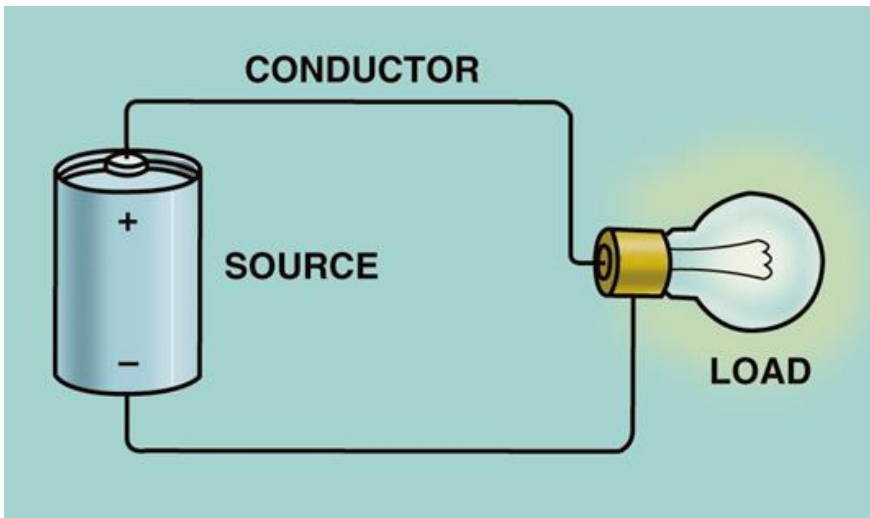
Bab 3: Sistem Distribusi

Tenaga Listrik Industri

Ir. Dian Artanto, S.T., M.Eng.

3.1 Source to Load

3.1.1 Konsep *Source to Load*



Gambar 3.1. Source to Load

Sumber: <https://share.google/8dxmv0SNX2Vil4aPc>

Konsep *source to load* merupakan prinsip dasar dalam sistem distribusi tenaga listrik industri yang menggambarkan aliran energi listrik dari sumber pembangkitan hingga mencapai peralatan pengguna akhir (*load*). Dalam lingkungan industri, sistem ini dirancang untuk memastikan bahwa energi listrik dapat disalurkan secara aman, andal, dan efisien kepada seluruh beban produksi.

Setiap komponen yang berada di antara sumber dan beban memiliki fungsi tertentu dalam menjaga kualitas daya, kontinuitas operasi, serta keselamatan personel dan peralatan.

Pada umumnya, sumber tenaga listrik industri berasal dari jaringan utilitas seperti PLN atau sumber cadangan berupa generator set (*genset*). Energi listrik yang berasal dari sumber tersebut kemudian dialirkan melalui sistem distribusi yang terdiri atas transformator, panel distribusi, penghantar daya, dan perangkat proteksi sebelum digunakan oleh berbagai peralatan produksi. Sistem distribusi yang baik harus mampu menjaga kestabilan tegangan, meminimalkan rugi-rugi daya, serta memberikan perlindungan terhadap gangguan kelistrikan yang mungkin terjadi.

3.1.2 Komponen Utama Jalur *Source to Load*

Aliran tenaga listrik dalam sistem industri umumnya dimulai dari sumber daya utama yang terhubung ke transformator. Transformator berfungsi menyesuaikan tingkat tegangan agar sesuai dengan kebutuhan instalasi industri. Pada banyak fasilitas industri di Indonesia, tegangan menengah dari jaringan distribusi diturunkan menjadi tegangan rendah 400/230 V untuk digunakan oleh berbagai peralatan operasional. Setelah melalui transformator, energi listrik disalurkan ke *Main Distribution Panel* (MDP) sebagai pusat distribusi utama.

Dari MDP, daya listrik diteruskan ke *Sub Distribution Panel* (SDP) yang bertugas mendistribusikan energi ke area atau proses tertentu. Selanjutnya, tenaga listrik dialirkan menuju *Motor Control Center* (MCC) yang berfungsi sebagai pusat kendali dan proteksi

motor listrik. Pada tahap akhir, energi listrik digunakan oleh berbagai beban seperti motor induksi, pompa, kompresor, sistem pendingin, konveyor, sistem penerangan, dan perangkat kontrol otomatisasi. Susunan distribusi tersebut membentuk jalur yang terintegrasi sehingga setiap beban memperoleh suplai listrik sesuai kebutuhan operasionalnya. Struktur distribusi dari sumber hingga beban merupakan elemen penting dalam menjamin keandalan sistem tenaga listrik industri (IEEE, 2023).

3.1.3 Aliran Daya dari Sumber ke Beban

Proses penyaluran energi listrik dimulai ketika sumber listrik menghasilkan atau menerima daya dari jaringan eksternal. Daya tersebut kemudian ditransmisikan menuju transformator untuk penyesuaian tegangan. Setelah itu, energi listrik memasuki sistem distribusi internal melalui panel utama dan panel cabang. Pada setiap tahap distribusi, perangkat proteksi seperti MCB, MCCB, relai proteksi, dan sistem pentanahan dipasang untuk mengamankan instalasi dari gangguan hubung singkat, beban lebih, maupun kebocoran arus.

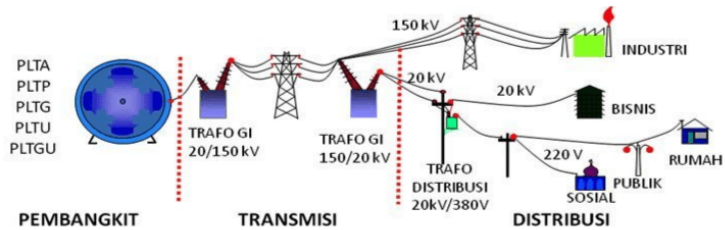
Ketika energi listrik mencapai beban, energi tersebut dikonversi menjadi bentuk energi lain sesuai kebutuhan proses industri. Motor listrik mengubah energi listrik menjadi energi mekanik untuk menggerakkan pompa dan konveyor, sedangkan pemanas listrik mengubah energi listrik menjadi energi panas. Pada sistem kontrol dan otomasi, energi listrik digunakan untuk mengoperasikan sensor, *Programmable Logic Controller* (PLC), dan *Human Machine Interface* (HMI).

Keandalan jalur *source to load* sangat menentukan kontinuitas produksi industri. Gangguan pada salah satu komponen distribusi dapat menyebabkan penghentian proses produksi, kerusakan peralatan, bahkan kerugian ekonomi yang signifikan. Oleh karena itu, perencanaan, instalasi, dan pemeliharaan sistem distribusi harus dilakukan secara sistematis untuk memastikan seluruh beban memperoleh suplai daya yang stabil dan aman. Selain itu, perkembangan teknologi distribusi modern mendorong penerapan sistem pemantauan dan proteksi yang lebih cerdas guna meningkatkan efisiensi serta keandalan operasi sistem tenaga listrik (U.S. Department of Energy, 2023).

3.2 Sistem Distribusi

3.2.1 Pengertian dan Fungsi Sistem Distribusi

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi listrik dari sumber menuju berbagai beban yang digunakan dalam proses produksi industri. Sistem ini menjadi penghubung antara sumber tenaga listrik dan peralatan pengguna sehingga energi listrik dapat dimanfaatkan secara efektif dan efisien. Dalam lingkungan industri, keberadaan sistem distribusi sangat penting karena hampir seluruh proses produksi bergantung pada ketersediaan energi listrik yang andal.



Gambar 2. Saluran Distribusi Listrik

Sumber: <https://share.google/uowdXPw29dvjDFT6Q>

Selain berfungsi sebagai sarana penyaluran daya, sistem distribusi juga berperan dalam menjaga kualitas tegangan, mengurangi rugi-rugi energi, serta mendukung keselamatan operasional. Oleh karena itu, perancangan sistem distribusi harus mempertimbangkan kapasitas beban, kondisi lingkungan, dan kebutuhan operasional perusahaan agar mampu mendukung proses produksi secara berkelanjutan.

3.2.2 Tujuan Sistem Distribusi Industri

Tujuan utama sistem distribusi tenaga listrik industri adalah menyediakan pasokan energi listrik yang kontinu dan stabil kepada seluruh peralatan produksi. Ketersediaan energi yang berkesinambungan sangat diperlukan untuk mencegah terjadinya gangguan proses yang dapat menyebabkan kerugian operasional maupun penurunan kualitas produk.

Selain itu, sistem distribusi dirancang untuk meningkatkan efisiensi penggunaan energi dan mempermudah pengawasan terhadap konsumsi daya listrik. Keandalan sistem distribusi menjadi salah satu faktor utama dalam mendukung keberlangsungan aktivitas industri sehingga berbagai aspek seperti proteksi, pemeliharaan, dan

manajemen beban perlu diterapkan secara optimal (Dwivedi et al., 2023).

3.2.3 Alur Distribusi Tenaga Listrik di Industri

Pada umumnya, tenaga listrik yang digunakan di industri berasal dari jaringan utilitas atau sumber cadangan seperti *generator set*. Energi listrik tersebut terlebih dahulu melewati transformator untuk menyesuaikan tingkat tegangan dengan kebutuhan sistem. Setelah itu, daya listrik disalurkan ke *Main Distribution Panel* (MDP) sebagai pusat distribusi utama.

Dari MDP, energi listrik diteruskan menuju *Sub Distribution Panel* (SDP) yang melayani area tertentu dalam fasilitas industri. Selanjutnya, daya listrik disalurkan ke *Motor Control Center* (MCC) sebelum digunakan oleh berbagai mesin produksi seperti pompa, *conveyor*, kompresor, dan sistem pendingin. Susunan distribusi ini memungkinkan pengelolaan beban yang lebih terstruktur dan memudahkan identifikasi gangguan pada sistem. Konfigurasi dasar tersebut umum digunakan dalam sistem distribusi tenaga listrik industri.

3.2.4 Komponen Utama Sistem Distribusi

Komponen utama dalam sistem distribusi tenaga listrik industri meliputi transformator, panel distribusi, busbar, dan kabel tenaga. Transformator berfungsi mengubah tingkat tegangan agar sesuai dengan kebutuhan beban. Panel distribusi digunakan sebagai pusat pengendalian dan pembagian energi listrik ke berbagai kelompok beban yang berbeda.

Sementara itu, busbar berfungsi sebagai penghantar arus berkapasitas besar di dalam panel distribusi. Kabel tenaga digunakan untuk menyalurkan energi listrik antarperalatan maupun antarpanel. Pemilihan komponen-komponen tersebut harus mempertimbangkan aspek kapasitas arus, keamanan, keandalan, dan kondisi lingkungan tempat instalasi digunakan.

3.2.5 Karakteristik Sistem Distribusi di Lingkungan Industri

Sistem distribusi tenaga listrik pada lingkungan industri memiliki karakteristik yang berbeda dibandingkan instalasi kelistrikan rumah tangga. Beban industri umumnya didominasi oleh motor listrik, sistem pendingin, pompa, serta berbagai peralatan otomatisasi yang membutuhkan pasokan listrik stabil dan berkualitas. Kondisi tersebut menyebabkan sistem distribusi harus dirancang untuk menangani arus awal yang tinggi, variasi beban, serta potensi gangguan listrik yang lebih kompleks.

Selain aspek keandalan, faktor keselamatan juga menjadi perhatian utama dalam pengoperasian sistem distribusi. Penerapan sistem pembumian, perangkat proteksi, serta kegiatan pemeliharaan berkala diperlukan untuk mengurangi risiko kecelakaan kerja dan kerusakan peralatan. Di sisi lain, penggunaan teknologi seperti *Variable Frequency Drive* (VFD) dan sistem pemantauan energi dapat meningkatkan efisiensi penggunaan daya listrik serta mendukung pengelolaan energi yang lebih baik (IEEE, 2022).

3.3 Panel Listrik

3.3.1 Pengertian dan Fungsi Panel Listrik

Panel listrik merupakan perangkat yang berfungsi sebagai pusat pengaturan, pengendalian, dan pendistribusian tenaga listrik dalam suatu instalasi industri. Dalam sistem distribusi tenaga listrik, panel listrik menjadi penghubung antara sumber daya listrik dengan berbagai beban yang digunakan dalam proses produksi. Melalui panel listrik, energi listrik dapat disalurkan secara aman, terkontrol, dan sesuai dengan kebutuhan masing-masing peralatan.



Gambar 3.2. Panel listrik

Sumber: <https://share.google/i19yx21Sk3CNE2b1x>

Selain berfungsi sebagai sarana distribusi tenaga listrik, panel listrik juga berperan sebagai sistem proteksi yang melindungi instalasi dari berbagai gangguan kelistrikan. Gangguan seperti hubung singkat, beban lebih, kebocoran arus, serta ketidakstabilan tegangan dapat diatasi melalui perangkat proteksi yang terpasang di dalam panel. Oleh karena itu, keberadaan panel listrik sangat penting

untuk menjaga keandalan sistem, melindungi peralatan produksi, serta menjamin keselamatan tenaga kerja.

Dalam lingkungan industri modern, panel listrik juga digunakan sebagai pusat pemantauan kondisi sistem kelistrikan. Berbagai parameter seperti tegangan, arus, daya, frekuensi, dan faktor daya dapat diamati melalui alat ukur yang tersedia sehingga operator dapat melakukan pengawasan dan pengendalian secara efektif. Dengan demikian, panel listrik tidak hanya berfungsi sebagai sarana distribusi, tetapi juga sebagai bagian penting dalam manajemen energi industri.

3.3.2 Jenis-Jenis Panel Listrik

Dalam sistem distribusi tenaga listrik industri, terdapat beberapa jenis panel listrik yang digunakan sesuai dengan fungsi dan kebutuhan operasional. Salah satu jenis yang paling umum adalah *Main Distribution Panel* (MDP), yaitu panel utama yang menerima pasokan listrik dari transformator atau sumber tenaga lainnya. MDP berfungsi sebagai pusat distribusi yang menyalurkan energi listrik ke berbagai panel distribusi lanjutan maupun langsung ke beban dengan kapasitas besar.

Selain MDP, terdapat *Sub Distribution Panel* (SDP) yang berfungsi mendistribusikan energi listrik ke area-area tertentu dalam fasilitas industri. Penggunaan SDP memungkinkan pembagian beban listrik menjadi lebih terorganisasi sehingga proses pengawasan, pemeliharaan, dan penanganan gangguan dapat dilakukan dengan lebih mudah. Sistem ini juga membantu

meningkatkan keandalan distribusi karena gangguan pada satu bagian tidak selalu memengaruhi keseluruhan instalasi.

Jenis panel lainnya adalah *Motor Control Center* (MCC), yaitu panel yang dirancang khusus untuk mengendalikan dan melindungi motor listrik yang digunakan dalam proses produksi. MCC banyak diterapkan pada sistem pompa, kompresor, *conveyor*, dan berbagai mesin industri lainnya. Penggunaan MCC memungkinkan pengoperasian motor menjadi lebih aman, efisien, dan mudah dikendalikan sesuai kebutuhan proses produksi.

3.3.3 Komponen Utama Panel Listrik

Panel listrik tersusun atas berbagai komponen yang bekerja secara terintegrasi untuk menjamin distribusi tenaga listrik berlangsung dengan aman dan andal. Salah satu komponen utama adalah perangkat proteksi seperti *Miniature Circuit Breaker* (MCB), *Molded Case Circuit Breaker* (MCCB), *Residual Current Device* (RCD), serta *thermal overload relay*. Komponen-komponen tersebut berfungsi melindungi sistem dari gangguan arus lebih, hubung singkat, dan kebocoran arus ke tanah.

Komponen penting lainnya adalah *busbar* yang berfungsi sebagai penghantar utama untuk menyalurkan arus listrik dalam kapasitas besar di dalam panel. Umumnya, *busbar* dibuat dari bahan tembaga atau aluminium karena memiliki konduktivitas listrik yang baik. Selain itu, sistem pengawatan yang tersusun dengan rapi juga sangat berpengaruh terhadap keamanan dan kemudahan pemeliharaan panel listrik.

Panel listrik modern biasanya dilengkapi dengan alat ukur dan sistem pemantauan yang memungkinkan operator memonitor kondisi sistem secara real time. Kehadiran teknologi pemantauan digital membantu meningkatkan efektivitas pengawasan dan memungkinkan tindakan pencegahan dilakukan sebelum terjadi gangguan yang lebih serius (Li et al., 2023).

3.3.4 Pemeliharaan dan Keamanan Panel Listrik

Pemeliharaan panel listrik merupakan kegiatan yang harus dilakukan secara berkala untuk menjaga keandalan dan umur pakai peralatan. Kegiatan pemeliharaan meliputi pemeriksaan kondisi fisik panel, pengencangan terminal, pembersihan komponen, pengecekan suhu operasi, serta pengujian perangkat proteksi. Pemeliharaan yang dilakukan secara rutin dapat mengurangi risiko kerusakan peralatan dan meminimalkan terjadinya gangguan pada proses produksi.

Selain pemeliharaan, aspek keselamatan kerja juga menjadi faktor yang sangat penting dalam pengoperasian panel listrik. Setiap pekerjaan yang melibatkan panel listrik harus mengikuti prosedur keselamatan yang berlaku, termasuk penerapan *Lock Out Tag Out* (LOTO) untuk mencegah peralatan beroperasi selama proses perbaikan atau pemeliharaan berlangsung. Penggunaan alat pelindung diri yang sesuai juga wajib dilakukan guna mengurangi risiko kecelakaan akibat sengatan listrik.

Penerapan sistem pemeliharaan yang baik serta kepatuhan terhadap standar keselamatan dapat meningkatkan keandalan sistem distribusi tenaga listrik dan mendukung kelangsungan operasional industri secara berkelanjutan (International Energy Agency, 2024).

Oleh karena itu, panel listrik harus selalu dijaga dalam kondisi yang aman, bersih, dan berfungsi sesuai dengan spesifikasi yang telah ditetapkan.

3.4 Single Phase dan Three Phase

3.4.1 Pengertian Sistem *Single Phase*

Sistem *single phase* merupakan sistem tenaga listrik arus bolak-balik yang menggunakan satu gelombang tegangan dengan satu penghantar fasa dan satu penghantar netral. Sistem ini umumnya digunakan pada instalasi rumah tangga, perkantoran kecil, serta beban listrik dengan kebutuhan daya relatif rendah. Pada sistem distribusi tegangan rendah di Indonesia, tegangan *single phase* yang umum digunakan adalah 220–230 volt.

Karakteristik utama sistem *single phase* adalah konstruksinya yang sederhana sehingga biaya instalasi dan pemeliharaannya relatif lebih rendah dibandingkan sistem *three phase*. Selain itu, sistem ini mudah diterapkan pada peralatan seperti lampu penerangan, komputer, televisi, dan peralatan elektronik rumah tangga lainnya. Namun, sistem *single phase* memiliki keterbatasan dalam menyalurkan daya besar karena arus yang mengalir menjadi lebih tinggi untuk daya yang sama. Kondisi tersebut dapat menyebabkan rugi-rugi daya yang lebih besar serta penurunan efisiensi pada aplikasi industri.

Dalam lingkungan industri, penggunaan sistem *single phase* biasanya terbatas pada beban bantu (*auxiliary load*), seperti

penerangan, stop kontak, panel kontrol, serta perangkat instrumentasi yang tidak memerlukan daya besar. Oleh karena itu, sistem ini jarang digunakan sebagai sumber utama penggerak mesin produksi.

3.4.2 Pengertian Sistem *Three Phase*

Sistem *three phase* merupakan sistem tenaga listrik yang terdiri atas tiga gelombang tegangan sinusoidal dengan perbedaan sudut fasa sebesar 120° . Sistem ini menjadi standar utama dalam pembangkitan, transmisi, dan distribusi tenaga listrik industri karena mampu menyalurkan daya yang lebih besar dengan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan sistem *single phase* (Velasco et al., 2023).

Pada sistem *three phase*, daya yang disalurkan relatif lebih stabil karena ketiga fasa bekerja secara bergantian. Stabilitas tersebut menghasilkan torsi motor yang lebih merata sehingga sangat sesuai digunakan untuk mengoperasikan motor induksi, pompa, kompresor, *conveyor*, *chiller*, dan berbagai mesin produksi lainnya. Selain itu, penggunaan penghantar listrik menjadi lebih efisien karena daya yang dapat disalurkan lebih besar untuk ukuran konduktor yang sama.

Dalam instalasi industri, tegangan yang umum digunakan adalah 380/220 volt atau 400/230 volt. Tegangan antar fasa digunakan untuk mengoperasikan motor dan peralatan berdaya besar, sedangkan tegangan antara fasa dan netral dapat dimanfaatkan untuk beban *single phase*. Dengan demikian, sistem *three phase* memberikan fleksibilitas yang tinggi dalam penyediaan energi listrik bagi berbagai jenis beban.

3.4.3 Perbandingan dan Penerapan dalam Industri

Perbedaan mendasar antara sistem *single phase* dan *three phase* terletak pada jumlah fasa, kapasitas penyaluran daya, efisiensi, serta bidang penerapannya. Sistem *single phase* lebih sesuai untuk beban ringan dengan kebutuhan daya rendah, sedangkan sistem *three phase* dirancang untuk memenuhi kebutuhan daya besar dan operasi yang berkelanjutan.

Dalam industri pengolahan susu, sebagian besar peralatan produksi menggunakan sistem *three phase* karena membutuhkan daya tinggi dan keandalan operasi yang baik. Motor pompa transfer susu, kompresor pendingin, *agitator*, *conveyor*, dan mesin pengemasan umumnya menggunakan suplai *three phase*. Sementara itu, sistem penerangan, komputer operator, panel kontrol, dan beberapa sensor masih dapat menggunakan suplai *single phase* yang berasal dari jaringan distribusi yang sama.

Keunggulan lain sistem *three phase* adalah kemampuannya menghasilkan medan magnet berputar secara alami pada motor induksi. Karakteristik ini memungkinkan motor beroperasi dengan torsi awal yang lebih baik, getaran yang lebih rendah, serta efisiensi energi yang lebih tinggi dibandingkan motor *single phase* (Bhosale et al., 2024).

Dengan mempertimbangkan kebutuhan daya, efisiensi energi, dan kontinuitas proses produksi, sistem *three phase* menjadi pilihan utama pada fasilitas industri modern. Sementara itu, sistem *single phase* tetap memiliki peranan penting sebagai sumber tenaga untuk beban pendukung yang tidak memerlukan kapasitas daya

besar. Kombinasi kedua sistem tersebut memungkinkan distribusi tenaga listrik yang lebih efektif, aman, dan ekonomis dalam lingkungan industri.

3.5 Transformator

3.5.1 Pengertian dan Fungsi Transformator

Transformator merupakan salah satu komponen utama dalam sistem distribusi tenaga listrik industri yang berfungsi untuk mengubah tingkat tegangan listrik dari satu nilai ke nilai lainnya melalui prinsip induksi elektromagnetik. Dalam lingkungan industri, transformator umumnya digunakan untuk menurunkan tegangan menengah dari jaringan utilitas listrik menjadi tegangan rendah yang dapat digunakan oleh berbagai peralatan produksi. Pada sistem distribusi tenaga listrik industri, transformator berperan sebagai penghubung antara sumber daya listrik dan beban sehingga kontinuitas operasional dapat terjaga dengan baik.

Keberadaan transformator sangat penting karena sebagian besar peralatan industri, seperti motor induksi, sistem kontrol, pompa, kompresor, dan peralatan produksi lainnya memerlukan tegangan kerja yang lebih rendah dibandingkan tegangan yang disalurkan oleh jaringan distribusi utama. Oleh karena itu, transformator menjadi elemen vital dalam menjaga stabilitas pasokan energi listrik sekaligus meningkatkan efisiensi penyaluran daya listrik ke seluruh area produksi. Selain itu, transformator juga

berfungsi untuk memberikan isolasi listrik antara sisi primer dan sisi sekunder sehingga tingkat keselamatan sistem menjadi lebih baik.

3.5.2 Prinsip Kerja Transformator

Prinsip kerja transformator didasarkan pada fenomena induksi elektromagnetik yang ditemukan oleh Michael Faraday. Ketika arus bolak-balik mengalir pada kumparan primer, akan terbentuk medan magnet yang berubah-ubah di dalam inti besi transformator. Perubahan medan magnet tersebut kemudian menginduksi tegangan pada kumparan sekunder sehingga energi listrik dapat ditransfer tanpa adanya hubungan listrik secara langsung.

Besarnya tegangan keluaran transformator dipengaruhi oleh perbandingan jumlah lilitan antara kumparan primer dan kumparan sekunder. Jika jumlah lilitan sekunder lebih sedikit dibandingkan lilitan primer, maka transformator berfungsi sebagai *step-down transformer* atau penurun tegangan. Sebaliknya, apabila jumlah lilitan sekunder lebih banyak, maka transformator berfungsi sebagai *step-up transformer* atau penaik tegangan. Pada instalasi industri, penggunaan transformator penurun tegangan lebih umum karena diperlukan untuk menyuplai peralatan produksi dengan tegangan operasional yang sesuai.

3.5.3 Jenis-Jenis Transformator Industri

Dalam sistem distribusi tenaga listrik industri terdapat beberapa jenis transformator yang digunakan sesuai kebutuhan operasional. Transformator distribusi merupakan jenis yang paling banyak digunakan karena berfungsi menyalurkan energi listrik dari

jaringan distribusi menuju panel distribusi utama. Jenis ini umumnya menggunakan pendingin minyak (*oil immersed transformer*) atau pendingin udara (*dry type transformer*).

Selain transformator distribusi, terdapat pula transformator instrumen yang digunakan untuk keperluan pengukuran dan proteksi sistem tenaga listrik. Transformator arus (*current transformer*) digunakan untuk menurunkan besaran arus ke tingkat yang aman bagi alat ukur dan sistem proteksi, sedangkan transformator tegangan (*potential transformer*) digunakan untuk menurunkan tegangan agar dapat dipantau oleh perangkat metering dan relay proteksi.

3.5.4 Pemeriksaan dan Pemeliharaan Transformator

Keandalan transformator sangat dipengaruhi oleh kegiatan inspeksi dan pemeliharaan yang dilakukan secara berkala. Pemeriksaan rutin meliputi pengamatan temperatur operasi, kondisi minyak isolasi, kebersihan bushing, serta adanya indikasi kebocoran pada tangki transformator. Peningkatan temperatur yang tidak normal dapat menjadi indikasi adanya gangguan internal yang berpotensi menyebabkan kerusakan serius.

Selain pemeriksaan visual, pengujian kondisi transformator dapat dilakukan melalui pemantauan parameter operasional dan analisis kondisi peralatan secara berkala. Pemantauan yang baik memungkinkan deteksi dini terhadap gangguan sehingga tindakan perbaikan dapat dilakukan sebelum terjadi kegagalan sistem yang lebih besar (Haoran & Ziyi, 2023). Seiring perkembangan teknologi, penerapan sistem pemantauan berbasis *Internet of Things* juga

semakin banyak digunakan untuk meningkatkan akurasi pengawasan kondisi transformator secara *real-time* (Mahamat et al., 2024).

3.5.5 Peran Transformator dalam Keandalan Sistem Distribusi

Dalam lingkungan industri, transformator memiliki kontribusi yang sangat besar terhadap keandalan sistem distribusi tenaga listrik. Gangguan pada transformator dapat menyebabkan terhentinya proses produksi, kerusakan peralatan, serta kerugian ekonomi yang signifikan. Oleh karena itu, pemilihan kapasitas transformator yang tepat, penerapan sistem proteksi yang memadai, serta pelaksanaan program pemeliharaan yang terencana menjadi faktor penting dalam menjamin kontinuitas operasi industri.

Dengan pengelolaan yang baik, transformator mampu menyediakan pasokan energi listrik yang stabil, aman, dan efisien bagi seluruh peralatan produksi. Keberhasilan sistem distribusi tenaga listrik industri pada akhirnya sangat bergantung pada kinerja transformator sebagai pusat transformasi energi listrik dari sumber menuju beban.

Bab 4: Sistem Proteksi

Kelistrikan

Ir. Dian Artanto, S.T., M.Eng.

4.1 Fuse

4.1.1 Pengertian Fuse

Fuse atau sekering merupakan salah satu perangkat proteksi listrik yang berfungsi untuk memutus aliran arus secara otomatis ketika terjadi arus berlebih atau hubung singkat (*short circuit*) pada suatu rangkaian listrik. Komponen ini bekerja berdasarkan prinsip pelelehan elemen penghantar yang terdapat di dalamnya. Ketika arus yang mengalir melebihi kapasitas nominal *fuse*, elemen tersebut akan memanaskan dan akhirnya meleleh sehingga rangkaian listrik terputus. Dengan terputusnya aliran arus, peralatan listrik dan instalasi dapat terlindungi dari kerusakan yang lebih serius.

Dalam sistem proteksi kelistrikan industri, *fuse* termasuk perangkat proteksi yang telah digunakan sejak lama karena memiliki konstruksi yang sederhana, respons yang cepat, dan biaya yang relatif rendah. Meskipun saat ini banyak sistem modern menggunakan *circuit breaker*, penggunaan *fuse* masih banyak dijumpai pada panel distribusi, rangkaian kontrol, sistem proteksi transformator, serta instalasi yang membutuhkan kemampuan pemutusan arus gangguan dalam waktu sangat singkat.

Peranan *fuse* sangat penting dalam menjaga keandalan sistem tenaga listrik. Ketika terjadi gangguan, energi panas yang dihasilkan oleh arus gangguan dapat menyebabkan kerusakan pada kabel, panel, motor, maupun peralatan elektronik lainnya. Oleh karena itu, pemasangan *fuse* yang sesuai dengan karakteristik beban menjadi salah satu langkah utama dalam sistem proteksi kelistrikan.

4.1.2 Prinsip Kerja dan Karakteristik Fuse

Prinsip kerja *fuse* didasarkan pada efek pemanasan yang terjadi ketika arus listrik mengalir melalui suatu penghantar. Setiap *fuse* memiliki elemen logam dengan ukuran dan material tertentu yang dirancang untuk menahan arus hingga batas nominalnya. Apabila arus yang mengalir melebihi nilai yang diizinkan, temperatur elemen akan meningkat hingga mencapai titik leleh, sehingga elemen tersebut putus dan memutuskan aliran listrik.

Karakteristik utama *fuse* adalah kemampuannya merespons gangguan arus dengan sangat cepat. Kecepatan ini menjadikan *fuse* efektif untuk melindungi peralatan dari kerusakan akibat arus hubung singkat yang tinggi. Dalam modul pelatihan sistem distribusi dan proteksi tenaga listrik disebutkan bahwa *fuse* berfungsi memutus arus ketika terjadi *short circuit* serta memiliki keunggulan berupa respons yang cepat dan biaya yang murah. Namun demikian, *fuse* memiliki kelemahan karena hanya dapat digunakan satu kali sehingga harus diganti setelah mengalami pemutusan akibat gangguan.

Selain nilai arus nominal, pemilihan *fuse* juga mempertimbangkan kapasitas pemutusan (*breaking capacity*),

karakteristik waktu-arus (*time-current characteristic*), serta jenis beban yang dilindungi. Pemilihan yang tepat akan memastikan bahwa *fuse* mampu bekerja secara selektif tanpa mengganggu bagian sistem yang tidak mengalami gangguan.

4.1.3 Aplikasi Fuse dalam Sistem Proteksi Kelistrikan

Dalam instalasi tenaga listrik, *fuse* digunakan pada berbagai tingkat sistem distribusi untuk memberikan perlindungan terhadap peralatan dan jaringan. Pada panel distribusi, *fuse* sering dipasang sebagai proteksi terhadap arus hubung singkat yang dapat merusak kabel dan komponen panel. Selain itu, *fuse* juga banyak digunakan pada rangkaian kontrol dan peralatan elektronik yang memerlukan perlindungan cepat terhadap lonjakan arus.

Pada aplikasi industri modern, penggunaan *fuse* sering dikombinasikan dengan perangkat proteksi lain seperti *Miniature Circuit Breaker* (MCB), *Molded Case Circuit Breaker* (MCCB), dan *Thermal Overload Relay*. Kombinasi tersebut bertujuan menghasilkan sistem proteksi yang lebih lengkap karena setiap perangkat memiliki fungsi dan karakteristik yang berbeda. Sebagai contoh, MCCB digunakan untuk melindungi kabel dan panel, sedangkan *thermal overload relay* digunakan untuk melindungi motor dari kondisi beban lebih. Sementara itu, *fuse* berperan memberikan proteksi cepat terhadap gangguan hubung singkat.

Dalam beberapa aplikasi khusus seperti *Variable Frequency Drive* (VFD), digunakan *semiconductor fuse* atau *high-speed fuse* yang dirancang untuk melindungi komponen elektronika daya yang sensitif terhadap arus gangguan. Jenis *fuse* ini memiliki waktu

respons yang sangat singkat sehingga mampu mencegah kerusakan komponen sebelum energi gangguan mencapai tingkat yang berbahaya.

Dengan karakteristiknya yang sederhana, cepat, dan andal, *fuse* tetap menjadi salah satu komponen penting dalam sistem proteksi kelistrikan. Pemahaman mengenai prinsip kerja, karakteristik, dan aplikasinya sangat diperlukan agar sistem distribusi tenaga listrik dapat beroperasi secara aman, efisien, dan berkelanjutan.

4.2 MCB

4.2.1 Pengertian MCB

Miniature Circuit Breaker (MCB) merupakan salah satu perangkat proteksi listrik yang digunakan untuk melindungi instalasi dan peralatan listrik dari gangguan arus lebih (*overload*) dan hubung singkat (*short circuit*). MCB bekerja secara otomatis dengan memutuskan aliran listrik ketika arus yang mengalir melebihi batas yang telah ditentukan. Setelah gangguan berhasil diatasi, MCB dapat diaktifkan kembali tanpa perlu mengganti komponen sebagaimana pada sekering (*fuse*).



Gambar 4.1. Miniature Circuit Breaker (MCB)

Sumber: <https://share.google/orlkxTBTNpZTLBaTt>

Dalam sistem distribusi tenaga listrik, MCB banyak digunakan pada sirkuit akhir, panel distribusi, instalasi rumah tangga, gedung perkantoran, maupun fasilitas industri. Penggunaan MCB bertujuan untuk meningkatkan keselamatan sistem kelistrikan sekaligus mencegah kerusakan peralatan akibat gangguan listrik. Dengan adanya proteksi yang memadai, risiko kebakaran dan kerusakan instalasi dapat diminimalkan.

Sebagai perangkat proteksi yang praktis dan andal, MCB telah menjadi komponen standar dalam berbagai sistem kelistrikan modern. Kemampuannya untuk bekerja secara otomatis menjadikan MCB sebagai salah satu perangkat proteksi yang paling banyak digunakan dalam instalasi listrik tegangan rendah.

4.2.2 Prinsip Kerja MCB

MCB bekerja berdasarkan dua mekanisme utama, yaitu proteksi termal dan proteksi magnetik. Proteksi termal berfungsi mendeteksi kondisi beban lebih yang terjadi dalam jangka waktu tertentu. Ketika arus yang mengalir melebihi kapasitas nominal, elemen bimetal di dalam MCB akan mengalami pemanasan dan

melengkung sehingga mekanisme pemutus bekerja untuk memutus aliran listrik.

Sementara itu, proteksi magnetik berfungsi mendeteksi arus hubung singkat yang nilainya jauh lebih besar dibandingkan arus normal. Pada kondisi ini, kumparan elektromagnetik di dalam MCB menghasilkan gaya magnet yang cukup besar untuk mengaktifkan mekanisme pemutus secara cepat. Dengan demikian, arus gangguan dapat dihentikan sebelum menimbulkan kerusakan pada kabel maupun peralatan listrik.

Kombinasi kedua mekanisme tersebut memungkinkan MCB memberikan perlindungan yang efektif terhadap berbagai jenis gangguan kelistrikan. Oleh karena itu, perangkat ini menjadi bagian penting dalam sistem proteksi tenaga listrik modern.

4.2.3 Fungsi MCB dalam Sistem Kelistrikan

Fungsi utama MCB adalah melindungi instalasi listrik dari arus lebih dan hubung singkat. Ketika terjadi peningkatan arus yang melebihi kapasitas penghantar, MCB akan memutus rangkaian sehingga kabel dan peralatan terlindungi dari panas berlebih yang dapat menyebabkan kerusakan atau kebakaran.

Selain sebagai alat proteksi, MCB juga dapat digunakan sebagai sakelar untuk menghubungkan dan memutus aliran listrik secara manual. Kemampuan ini memudahkan proses pemeliharaan dan perbaikan instalasi karena teknisi dapat mengisolasi bagian tertentu dari sistem listrik dengan aman.

Dalam lingkungan industri, MCB sering digunakan untuk melindungi sirkuit penerangan, stop kontak, panel distribusi, serta

peralatan dengan kapasitas daya relatif kecil. Berdasarkan materi distribusi dan proteksi tenaga listrik, MCB digunakan sebagai proteksi pada sirkuit akhir (*final circuit protection*) sehingga gangguan dapat diputus sedekat mungkin dengan sumber gangguan.

4.2.4 Jenis-Jenis MCB

MCB tersedia dalam berbagai karakteristik pemutusan yang disesuaikan dengan jenis beban yang dilindungi. Salah satu jenis yang paling umum adalah MCB kurva B yang digunakan untuk beban resistif seperti lampu dan pemanas. Jenis ini memiliki sensitivitas yang tinggi terhadap kenaikan arus sehingga cocok untuk beban yang tidak memiliki arus awal besar.

Jenis berikutnya adalah MCB kurva C yang banyak digunakan pada beban induktif seperti motor listrik, pompa, dan transformator kecil. MCB jenis ini mampu menahan arus awal (*inrush current*) yang lebih tinggi tanpa menyebabkan pemutusan yang tidak diperlukan.

Selain itu, terdapat MCB kurva D yang dirancang untuk peralatan dengan arus awal sangat besar, seperti motor industri dan mesin tertentu. Pemilihan jenis kurva yang tepat sangat penting agar sistem proteksi dapat bekerja secara optimal tanpa mengganggu operasional peralatan.

4.2.5 Keunggulan dan Keterbatasan MCB

MCB memiliki beberapa keunggulan, antara lain mudah dioperasikan, dapat digunakan kembali setelah gangguan diatasi, serta memiliki tingkat keandalan yang tinggi. Selain itu, ukuran yang

relatif kecil dan pemasangan yang sederhana menjadikan MCB sangat praktis digunakan pada berbagai jenis instalasi listrik.

Meskipun demikian, MCB juga memiliki keterbatasan. Kapasitas pemutusannya relatif lebih kecil dibandingkan *Molded Case Circuit Breaker* (MCCB) sehingga kurang sesuai untuk aplikasi dengan arus besar. Oleh karena itu, pada panel utama atau sistem distribusi industri berkapasitas tinggi biasanya digunakan MCCB sebagai perangkat proteksi utama, sedangkan MCB digunakan pada sirkuit cabang dan beban yang lebih kecil.

Secara keseluruhan, MCB merupakan perangkat proteksi yang sangat penting dalam sistem kelistrikan. Dengan kemampuan mendeteksi dan memutus gangguan secara otomatis, MCB berperan dalam menjaga keselamatan manusia, melindungi peralatan, serta meningkatkan keandalan distribusi tenaga listrik pada berbagai aplikasi.

4.3 MCCB (Molded Case Circuit Breaker)

4.3.1 Pengertian dan Fungsi MCCB

Molded Case Circuit Breaker (MCCB) merupakan perangkat proteksi listrik yang digunakan untuk melindungi instalasi dan peralatan listrik dari gangguan arus lebih (*overload*) maupun hubung singkat (*short circuit*). MCCB dirancang untuk memutus aliran listrik secara otomatis ketika arus yang mengalir melebihi batas yang telah ditentukan sehingga dapat mencegah kerusakan

peralatan, gangguan operasional, dan risiko kebakaran akibat kegagalan sistem kelistrikan.



Gambar 4.2. Molded Case Circuit Breaker (MCCB)

Sumber: <https://share.google/MopD8PiFUpZbeFKCV>

Dalam sistem distribusi tenaga listrik, MCCB banyak digunakan pada panel distribusi utama maupun panel distribusi cabang karena memiliki kapasitas arus yang relatif besar dibandingkan dengan *Miniature Circuit Breaker* (MCB). Kemampuan tersebut menjadikan MCCB sebagai salah satu komponen penting dalam menjaga keamanan dan keandalan sistem tenaga listrik. Selain berfungsi sebagai alat proteksi, MCCB juga dapat digunakan sebagai sakelar untuk menghubungkan dan memutuskan rangkaian listrik dalam kondisi normal maupun saat terjadi gangguan (Schneider Electric, 2024).

Penggunaan MCCB sangat umum ditemukan pada instalasi industri, gedung komersial, rumah sakit, pusat perbelanjaan, dan berbagai fasilitas yang memerlukan sistem distribusi listrik yang aman serta mampu menangani beban listrik dalam kapasitas besar.

4.3.2 Prinsip Kerja MCCB

Prinsip kerja MCCB didasarkan pada kemampuan mendeteksi kondisi arus yang melebihi nilai pengaturan yang telah ditetapkan. Ketika terjadi beban lebih atau hubung singkat, mekanisme pemutus akan bekerja secara otomatis untuk memisahkan kontak listrik sehingga aliran arus terhenti dan gangguan tidak menyebar ke bagian sistem lainnya.

Pada umumnya, MCCB dilengkapi dengan sistem proteksi termal dan magnetik. Proteksi termal bekerja berdasarkan kenaikan suhu akibat arus lebih yang berlangsung dalam periode tertentu. Ketika elemen termal mengalami pemanasan hingga mencapai batas tertentu, mekanisme pemutus akan diaktifkan. Sementara itu, proteksi magnetik berfungsi mendeteksi arus hubung singkat yang sangat besar dan memutus rangkaian dalam waktu yang sangat singkat.

Keunggulan MCCB dibandingkan dengan sekering (*fuse*) adalah kemampuannya untuk digunakan kembali setelah gangguan berhasil diatasi. Setelah dilakukan pemeriksaan dan perbaikan pada sistem, MCCB dapat diaktifkan kembali tanpa perlu mengganti komponen utama. Hal ini menjadikan MCCB lebih efisien dari segi operasional dan pemeliharaan.

4.3.3 Penerapan MCCB dalam Sistem Distribusi Tenaga Listrik

MCCB memiliki peran yang sangat penting dalam sistem distribusi tenaga listrik modern. Pada panel distribusi utama, MCCB digunakan sebagai pengaman utama yang mengendalikan distribusi daya listrik ke berbagai bagian instalasi. Sementara itu, pada panel

distribusi cabang, MCCB berfungsi melindungi kelompok beban tertentu sehingga gangguan dapat diisolasi tanpa memengaruhi keseluruhan sistem.

Dalam instalasi industri, MCCB sering digunakan untuk melindungi motor listrik, transformator, generator, dan berbagai peralatan produksi yang membutuhkan pasokan listrik dalam kapasitas besar. Penggunaan MCCB memungkinkan sistem proteksi bekerja secara selektif sehingga hanya bagian yang mengalami gangguan yang terputus, sedangkan bagian lain tetap dapat beroperasi secara normal.

Selain itu, MCCB juga mendukung penerapan koordinasi proteksi dalam sistem tenaga listrik. Melalui pengaturan karakteristik pemutusan yang tepat, setiap MCCB dapat bekerja sesuai tingkatannya sehingga gangguan dapat ditangani secara efektif tanpa menyebabkan pemadaman yang tidak diperlukan. Penerapan koordinasi proteksi yang baik berkontribusi terhadap peningkatan keandalan dan kontinuitas pelayanan sistem tenaga listrik (Das, 2023).

4.3.4 Keunggulan dan Pemeliharaan MCCB

MCCB memiliki berbagai keunggulan yang menjadikannya salah satu perangkat proteksi yang banyak digunakan dalam instalasi listrik. Salah satu keunggulan utama adalah kapasitas pemutusan yang tinggi sehingga mampu menangani arus gangguan yang besar dengan aman. Selain itu, sebagian besar MCCB dilengkapi dengan fitur pengaturan arus yang memungkinkan pengguna menyesuaikan karakteristik proteksi sesuai kebutuhan sistem.

Keunggulan lainnya adalah konstruksi yang kokoh dan tingkat keandalan yang tinggi dalam berbagai kondisi operasi. MCCB juga tersedia dalam berbagai ukuran dan kapasitas sehingga dapat digunakan pada berbagai jenis instalasi, mulai dari bangunan komersial hingga fasilitas industri berskala besar.

Agar kinerjanya tetap optimal, MCCB memerlukan pemeliharaan secara berkala. Kegiatan pemeliharaan meliputi pemeriksaan kondisi fisik, pengujian mekanisme pemutusan, pengecekan kekencangan terminal, serta pembersihan dari debu dan kotoran yang dapat memengaruhi kinerja perangkat. Pemeliharaan yang dilakukan secara rutin akan membantu memastikan MCCB mampu bekerja dengan baik ketika terjadi gangguan serta memperpanjang umur pakai perangkat. Dengan pemilihan, pengoperasian, dan pemeliharaan yang tepat, MCCB dapat memberikan perlindungan yang efektif bagi sistem distribusi tenaga listrik dan mendukung keselamatan instalasi secara keseluruhan.

4.4 Overload Relay

4.4.1 Pengertian dan Fungsi Overload Relay

Overload relay merupakan perangkat proteksi yang digunakan untuk melindungi motor listrik dari kondisi beban lebih (*overload*) yang dapat menyebabkan kenaikan temperatur secara berlebihan. Kondisi beban lebih umumnya terjadi ketika motor bekerja melebihi kapasitas nominalnya akibat peningkatan beban mekanis, kerusakan komponen penggerak, atau gangguan pada

sistem produksi. Apabila kondisi tersebut tidak segera ditangani, motor dapat mengalami kerusakan pada isolasi lilitan, penurunan efisiensi kerja, bahkan kegagalan operasional secara permanen.

Dalam sistem proteksi tenaga listrik, *overload relay* berfungsi mendeteksi arus yang melebihi nilai pengenalan motor dalam jangka waktu tertentu. Ketika arus melebihi batas yang telah ditetapkan, perangkat ini akan mengaktifkan mekanisme pemutusan rangkaian kontrol sehingga motor berhenti beroperasi sebelum terjadi kerusakan yang lebih serius. Oleh karena itu, *overload relay* menjadi salah satu komponen penting dalam sistem kendali motor, khususnya pada instalasi industri yang menggunakan motor listrik sebagai penggerak utama proses produksi.

Penerapan *overload relay* tidak hanya bertujuan melindungi motor, tetapi juga menjaga kontinuitas operasional dan mengurangi biaya perawatan. Dengan adanya sistem proteksi yang memadai, potensi kerusakan peralatan dapat diminimalkan sehingga produktivitas industri tetap terjaga. Pada lingkungan industri modern, perangkat ini banyak digunakan pada pompa, kompresor, konveyor, agitator, dan berbagai mesin produksi lainnya yang beroperasi secara terus-menerus.

4.4.2 Prinsip Kerja dan Jenis Overload Relay

Prinsip kerja *overload relay* didasarkan pada kemampuan perangkat untuk mendeteksi kenaikan arus yang terjadi akibat beban berlebih. Salah satu jenis yang paling umum digunakan adalah *thermal overload relay*. Perangkat ini memanfaatkan elemen bimetal yang akan mengalami pemuaian ketika dialiri arus listrik yang

melebihi batas normal. Peningkatan temperatur menyebabkan bimetal melengkung dan menggerakkan kontak pemutus sehingga rangkaian kontrol motor terputus secara otomatis. Mekanisme ini memberikan perlindungan terhadap kerusakan motor akibat panas berlebih yang berlangsung dalam waktu tertentu (Pirade et al., 2023).

Selain tipe termal, terdapat pula *electronic overload relay* yang menggunakan sensor arus dan rangkaian elektronik untuk memantau kondisi operasi motor secara lebih akurat. Dibandingkan tipe termal, perangkat elektronik memiliki tingkat presisi yang lebih tinggi serta mampu menyediakan berbagai fitur tambahan seperti pengaturan parameter yang fleksibel, indikasi gangguan, dan komunikasi dengan sistem kontrol otomatis.

Perkembangan teknologi industri juga mendorong integrasi *overload relay* dengan sistem otomasi berbasis *Programmable Logic Controller* (PLC) dan *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA). Integrasi tersebut memungkinkan pemantauan kondisi motor secara real-time sehingga proses identifikasi dan penanganan gangguan dapat dilakukan dengan lebih cepat. Dengan demikian, penggunaan *overload relay* tidak hanya berfungsi sebagai alat proteksi, tetapi juga menjadi bagian dari sistem pemeliharaan prediktif yang mendukung keandalan operasional industri.

4.4.3 Penerapan Overload Relay pada Sistem Motor Industri

Penerapan *overload relay* banyak dijumpai pada sistem penggerak motor listrik di sektor industri, termasuk pompa sentrifugal, kompresor, konveyor, dan peralatan produksi lainnya. Dalam sistem tersebut, *overload relay* biasanya dipasang bersama

kontaktor dan perangkat proteksi lain seperti *Miniature Circuit Breaker* (MCB) atau *Molded Case Circuit Breaker* (MCCB). Kombinasi perangkat ini memungkinkan perlindungan yang lebih komprehensif terhadap berbagai jenis gangguan kelistrikan.

Pada kondisi operasi normal, motor bekerja sesuai arus nominal yang tercantum pada *nameplate*. Namun, apabila terjadi peningkatan beban akibat kerusakan mekanis, kemacetan poros, atau ketidakseimbangan sistem, arus motor akan meningkat secara signifikan. Dalam kondisi tersebut, *overload relay* akan mendeteksi kenaikan arus dan memutus rangkaian kontrol untuk mencegah kerusakan pada motor. Penelitian menunjukkan bahwa pengaturan nilai *setting* yang tepat sangat berpengaruh terhadap efektivitas perlindungan motor serta mampu mengurangi risiko gangguan operasional akibat kesalahan proteksi (Sartika et al., 2024).

Selain melindungi peralatan, penggunaan *overload relay* juga berkontribusi terhadap keselamatan kerja dan efisiensi operasional. Motor yang terlindungi dengan baik memiliki umur pakai yang lebih panjang serta memerlukan biaya perawatan yang lebih rendah. Oleh karena itu, pemilihan jenis dan pengaturan *overload relay* harus dilakukan berdasarkan karakteristik motor, kondisi beban, dan kebutuhan operasional agar sistem proteksi dapat bekerja secara optimal.

4.5 ELCB/RCCB

4.5.1 Pengertian ELCB/RCCB

Earth Leakage Circuit Breaker (ELCB) dan *Residual Current Circuit Breaker* (RCCB) merupakan perangkat proteksi yang dirancang untuk mendeteksi kebocoran arus listrik ke tanah dan memutuskan rangkaian secara otomatis ketika nilai kebocoran melebihi batas yang telah ditentukan. Perangkat ini digunakan untuk meningkatkan keselamatan instalasi listrik dengan mengurangi risiko sengatan listrik pada manusia serta mencegah terjadinya kebakaran akibat gangguan isolasi.

Dalam perkembangan teknologi proteksi listrik, RCCB lebih banyak digunakan dibandingkan ELCB konvensional karena memiliki tingkat sensitivitas yang lebih tinggi terhadap arus bocor. Perangkat ini menjadi bagian penting dari sistem proteksi modern yang melengkapi fungsi MCB dan MCCB. Jika MCB berfungsi melindungi rangkaian dari arus lebih dan hubung singkat, maka RCCB berfungsi mendeteksi kebocoran arus yang tidak dapat diidentifikasi oleh perangkat proteksi arus lebih.

Penggunaan ELCB/RCCB sangat penting pada bangunan yang memiliki tingkat risiko tinggi terhadap kontak listrik, seperti rumah sakit, laboratorium, fasilitas industri, area basah, serta bangunan komersial yang menggunakan banyak peralatan listrik. Keberadaan perangkat ini membantu menciptakan sistem kelistrikan yang lebih aman dan andal.

4.5.2 Prinsip Kerja ELCB/RCCB

RCCB bekerja berdasarkan prinsip keseimbangan arus antara penghantar fasa dan netral. Dalam kondisi normal, jumlah arus yang mengalir menuju beban melalui penghantar fasa akan sama dengan arus yang kembali melalui penghantar netral. Oleh karena itu, tidak terdapat arus sisa yang terdeteksi oleh perangkat.

Ketika terjadi kebocoran arus akibat kerusakan isolasi, kontak manusia dengan bagian bertegangan, atau adanya jalur konduktif menuju tanah, sebagian arus akan mengalir keluar dari sistem. Kondisi ini menyebabkan perbedaan antara arus fasa dan arus netral. Perbedaan tersebut dideteksi oleh transformator arus diferensial yang terdapat di dalam RCCB. Jika nilai arus bocor melampaui batas sensitivitas yang telah ditentukan, mekanisme pemutus akan bekerja dan memutus aliran listrik dalam waktu yang sangat singkat.

Prinsip kerja ini menjadikan RCCB sebagai perangkat proteksi yang efektif dalam mengurangi risiko cedera akibat sengatan listrik. Menurut International Electrotechnical Commission (2024), penggunaan perangkat arus sisa merupakan salah satu metode proteksi tambahan yang direkomendasikan untuk meningkatkan keselamatan instalasi listrik pada bangunan maupun fasilitas industri.

4.5.3 Fungsi dan Penerapan ELCB/RCCB

Fungsi utama ELCB/RCCB adalah melindungi manusia dari bahaya sengatan listrik yang disebabkan oleh kebocoran arus. Selain itu, perangkat ini juga berfungsi mencegah kerusakan instalasi dan

mengurangi risiko kebakaran yang dapat timbul akibat gangguan isolasi pada kabel maupun peralatan listrik.

Penerapan RCCB banyak dijumpai pada instalasi rumah tinggal, gedung perkantoran, fasilitas pendidikan, rumah sakit, serta lingkungan industri. Pada area yang sering terkena air atau memiliki kelembapan tinggi, penggunaan RCCB menjadi sangat penting karena risiko kebocoran arus relatif lebih besar dibandingkan lingkungan kering. Oleh karena itu, stop kontak, panel distribusi, dan peralatan listrik yang berada di area basah umumnya dilengkapi dengan proteksi RCCB.

Dalam praktik instalasi listrik, nilai sensitivitas RCCB yang paling umum digunakan untuk perlindungan manusia adalah 30 mA. Nilai tersebut dianggap cukup sensitif untuk mendeteksi arus bocor yang berpotensi membahayakan keselamatan manusia sekaligus menghindari pemutusan yang tidak diperlukan selama operasi normal.

4.5.4 Pemeriksaan dan Pemeliharaan ELCB/RCCB

Agar dapat berfungsi secara optimal, ELCB/RCCB memerlukan pemeriksaan dan pemeliharaan secara berkala. Salah satu metode pemeriksaan yang paling sederhana adalah menggunakan tombol *test* yang tersedia pada perangkat. Tombol ini berfungsi mensimulasikan kondisi kebocoran arus sehingga mekanisme pemutus dapat diuji tanpa menimbulkan gangguan pada instalasi.

Selain pengujian fungsi, pemeriksaan visual perlu dilakukan untuk memastikan tidak terdapat kerusakan fisik, korosi, atau

sambungan yang longgar. Lingkungan yang lembap dan berdebu dapat memengaruhi kinerja perangkat sehingga inspeksi rutin menjadi bagian penting dalam program pemeliharaan sistem kelistrikan.

Pemeliharaan yang baik akan meningkatkan keandalan sistem proteksi dan memastikan perangkat mampu bekerja sesuai fungsinya ketika terjadi gangguan. Menurut Harten (2023), pengujian berkala terhadap perangkat proteksi arus bocor merupakan langkah penting untuk menjaga keselamatan pengguna serta mempertahankan keandalan instalasi listrik dalam jangka panjang.

Bab 5: Pemeriksaan dan Perawatan Sistem Kelistrikan

Ir. Muhammad Prayadi Sulistyanto, M.Eng.

5.1 Autonomous Maintenance

5.1.1 Pengertian *Autonomous Maintenance*

Autonomous Maintenance merupakan salah satu pilar utama dalam konsep *Total Productive Maintenance* (TPM) yang bertujuan memberikan tanggung jawab kepada operator untuk melakukan perawatan dasar terhadap mesin dan peralatan yang mereka operasikan. Konsep ini dikembangkan untuk meningkatkan keterlibatan operator dalam menjaga kondisi peralatan sehingga potensi kerusakan dapat dideteksi lebih awal dan kinerja mesin dapat dipertahankan pada kondisi optimal. Dalam penerapannya, operator tidak hanya bertugas mengoperasikan mesin, tetapi juga melakukan aktivitas perawatan sederhana secara rutin.



Gambar 5.1. Autonomous Maintenance.

Sumber: <https://share.google/4Jf7k92RivJOHBx77>

Kegiatan *Autonomous Maintenance* meliputi pembersihan peralatan, pelumasan, pengencangan komponen, inspeksi menggunakan pancaindra, pendokumentasian aktivitas, serta pelaporan apabila ditemukan indikasi kerusakan. Melalui kegiatan tersebut, operator diharapkan mampu mengenali kondisi normal dan abnormal pada mesin sehingga tindakan korektif dapat dilakukan sebelum terjadi gangguan yang lebih serius.

Dalam sistem pemeliharaan modern, *Autonomous Maintenance* tidak dimaksudkan untuk menggantikan fungsi teknisi pemeliharaan. Sebaliknya, pendekatan ini bertujuan membangun kerja sama antara operator dan tim pemeliharaan sehingga setiap pihak dapat berkontribusi sesuai dengan tanggung jawabnya. Dengan demikian, efektivitas pemeliharaan dapat meningkat dan waktu henti (*downtime*) mesin dapat diminimalkan.

5.1.2 Tujuan dan Manfaat *Autonomous Maintenance*

Tujuan utama *Autonomous Maintenance* adalah menjaga peralatan tetap berada dalam kondisi dasar yang baik serta memastikan mesin beroperasi sesuai standar yang telah ditetapkan. Program ini berfokus pada pencegahan kerusakan melalui kegiatan perawatan sederhana yang dilakukan secara konsisten oleh operator. Menurut materi pelatihan TPM, salah satu sasaran penting dari *Autonomous Maintenance* adalah mengembalikan peralatan ke kondisi optimal (*optimal equipment conditions*), menetapkan kondisi dasar mesin (*basic equipment conditions*), serta melaksanakan pemeriksaan, pembersihan, dan pelumasan harian.

Dari aspek peralatan, penerapan *Autonomous Maintenance* membantu mencegah percepatan kerusakan yang disebabkan oleh kondisi seperti kotoran, kurang pelumasan, penggunaan pelumas yang tidak sesuai, maupun komponen pengikat yang longgar. Dengan menjaga kondisi dasar tersebut, umur pakai mesin dapat diperpanjang dan risiko kegagalan peralatan dapat dikurangi secara signifikan.

Selain memberikan manfaat bagi peralatan, *Autonomous Maintenance* juga berkontribusi terhadap pengembangan sumber daya manusia. Program ini mendorong operator untuk meningkatkan kemampuan teknis dan pemahaman terhadap mesin yang dioperasikan. Operator menjadi lebih peka terhadap gejala awal kerusakan serta mampu melakukan tindakan pencegahan sebelum terjadi gangguan yang lebih besar. Kondisi tersebut pada akhirnya meningkatkan budaya kepedulian terhadap peralatan dan mendorong terciptanya lingkungan kerja yang lebih produktif.

5.1.3 Peran Operator dalam *Autonomous Maintenance*

Keberhasilan penerapan *Autonomous Maintenance* sangat bergantung pada keterlibatan operator sebagai pelaksana utama kegiatan pemeliharaan dasar. Dalam konsep TPM, operator memiliki tanggung jawab untuk menjaga kondisi mesin melalui kegiatan rutin yang dilakukan setiap hari. Aktivitas tersebut mencakup pembersihan, pelumasan, pengencangan komponen, inspeksi visual, serta pencatatan hasil pemeriksaan.

Operator juga bertugas melakukan inspeksi menggunakan pancaindra, seperti penglihatan, pendengaran, dan perabaan, untuk

mendeteksi adanya gejala abnormal. Indikasi seperti suara tidak normal, getaran berlebih, kebocoran, suhu yang meningkat, atau perubahan kondisi fisik komponen harus segera dilaporkan kepada tim pemeliharaan agar dapat ditindaklanjuti. Dengan cara ini, kerusakan dapat dicegah sebelum berkembang menjadi kegagalan yang menyebabkan penghentian produksi.

Selain itu, operator memiliki tanggung jawab untuk menjalankan mesin sesuai prosedur operasi standar (*Standard Operating Procedure* atau SOP). Pengoperasian yang benar merupakan bagian penting dari pemeliharaan karena kesalahan penggunaan dapat mempercepat keausan dan meningkatkan risiko kerusakan peralatan. Oleh sebab itu, *Autonomous Maintenance* tidak hanya berfokus pada aktivitas pemeliharaan fisik, tetapi juga pada disiplin operasional yang mendukung keandalan mesin.

Secara keseluruhan, *Autonomous Maintenance* merupakan pendekatan pemeliharaan yang menempatkan operator sebagai garda terdepan dalam menjaga kondisi peralatan. Melalui kegiatan perawatan dasar yang dilakukan secara konsisten, perusahaan dapat meningkatkan keandalan mesin, mengurangi frekuensi kerusakan, meningkatkan produktivitas, serta menciptakan budaya pemeliharaan yang berkelanjutan dalam lingkungan kerja industri.

5.2 Inspeksi Kelistrikan

5.2.1 Pengertian dan Tujuan Inspeksi Kelistrikan

Inspeksi kelistrikan merupakan kegiatan pemeriksaan kondisi sistem kelistrikan untuk memastikan seluruh komponen bekerja sesuai standar, aman digunakan, dan mampu mendukung operasional peralatan secara optimal. Kegiatan ini merupakan bagian penting dari program pemeliharaan preventif yang bertujuan mendeteksi potensi kerusakan sejak dini sebelum berkembang menjadi gangguan yang lebih serius.



Gambar 5.2. Inspeksi Kelistrikan

Sumber: <https://share.google/35HTJdBQDkjG4WBGQ>

Dalam lingkungan industri, inspeksi kelistrikan memiliki peran yang sangat penting karena gangguan pada sistem listrik dapat menyebabkan berhentinya proses produksi, kerusakan peralatan, hingga risiko kecelakaan kerja. Oleh karena itu, inspeksi dilakukan secara berkala untuk memastikan seluruh komponen kelistrikan berada dalam kondisi yang baik dan berfungsi sesuai spesifikasi desain.

Tujuan utama inspeksi kelistrikan meliputi mendeteksi potensi kerusakan lebih awal, mencegah terjadinya hubung singkat (*short circuit*), mencegah *overheating*, mengurangi risiko kebakaran, menjaga kestabilan operasi mesin, serta memastikan keselamatan kerja personel yang terlibat dalam pengoperasian dan pemeliharaan peralatan listrik.

5.2.2 Ruang Lingkup Inspeksi Kelistrikan

Inspeksi kelistrikan mencakup berbagai komponen yang terdapat pada sistem distribusi dan pengendalian tenaga listrik. Komponen yang diperiksa meliputi panel listrik, motor listrik, sensor, *limit switch*, kabel dan *wiring*, terminal koneksi, *inverter* atau *Variable Frequency Drive* (VFD), *Programmable Logic Controller* (PLC), *power supply*, kontaktor, relay, MCB, MCCB, serta sistem *grounding*.

Pemeriksaan terhadap komponen-komponen tersebut bertujuan untuk memastikan bahwa seluruh sistem bekerja secara normal dan tidak menunjukkan indikasi kerusakan. Selain kondisi fisik, aspek kelistrikan seperti tegangan, arus, dan kualitas sambungan juga menjadi bagian penting dalam proses inspeksi.

Ruang lingkup inspeksi yang luas memungkinkan identifikasi dini terhadap berbagai potensi gangguan yang dapat memengaruhi kinerja sistem. Dengan demikian, tindakan perbaikan dapat dilakukan sebelum gangguan berkembang menjadi kerusakan yang lebih besar dan menyebabkan penghentian produksi.

5.2.3 Jenis-Jenis Inspeksi Kelistrikan

Inspeksi kelistrikan dapat dibedakan menjadi beberapa jenis berdasarkan metode pemeriksaannya. Jenis pertama adalah *visual inspection*, yaitu pemeriksaan yang dilakukan tanpa menggunakan alat ukur. Pemeriksaan ini bertujuan mengidentifikasi kondisi fisik komponen seperti kabel terkelupas, baut longgar, perubahan warna komponen, bekas terbakar, korosi, debu berlebih, dan getaran abnormal.

Jenis kedua adalah *mechanical inspection*, yaitu pemeriksaan terhadap kondisi mekanis komponen. Pemeriksaan ini meliputi pengecekan kekencangan terminal, kondisi *fan* pendingin, kondisi *mounting*, dan kondisi konektor. Pemeriksaan mekanis sangat penting karena banyak gangguan kelistrikan yang disebabkan oleh sambungan yang longgar atau komponen yang mengalami keausan.

Jenis ketiga adalah *electrical measurement*. Pada tahap ini dilakukan pengukuran menggunakan alat ukur untuk mengetahui parameter listrik seperti tegangan, arus, resistansi, frekuensi, tahanan isolasi (*insulation resistance*), dan tahanan pentanahan (*ground resistance*). Hasil pengukuran digunakan untuk mengevaluasi kondisi aktual sistem dan membandingkannya dengan standar yang berlaku.

5.2.4 Thermal Inspection sebagai Metode Deteksi Dini

Salah satu metode inspeksi yang semakin banyak digunakan adalah *thermal inspection*. Metode ini memanfaatkan kamera termal untuk mendeteksi temperatur abnormal pada komponen kelistrikan. Pemeriksaan suhu menjadi penting karena peningkatan temperatur

sering kali merupakan indikasi awal terjadinya gangguan pada sistem listrik.

Melalui *thermal inspection*, teknisi dapat mengidentifikasi terminal yang panas, kabel yang mengalami beban berlebih, kontaktor yang mengalami pemanasan abnormal, serta bantalan motor (*bearing*) yang menunjukkan gejala kerusakan. Keunggulan metode ini adalah kemampuannya mendeteksi masalah tanpa harus mematikan peralatan sehingga proses produksi tetap dapat berlangsung.

Pemanfaatan teknologi termografi membantu meningkatkan efektivitas program pemeliharaan prediktif karena potensi kerusakan dapat diketahui lebih awal. Dengan demikian, tindakan korektif dapat direncanakan secara tepat sebelum terjadi kegagalan peralatan.

5.2.5 Keselamatan Kerja dalam Inspeksi Kelistrikan

Pelaksanaan inspeksi kelistrikan harus selalu memperhatikan aspek keselamatan dan kesehatan kerja. Risiko yang dapat muncul selama inspeksi antara lain sengatan listrik, *arc flash*, korsleting, kebakaran, ledakan panel, serta kerusakan peralatan. Oleh karena itu, setiap kegiatan inspeksi wajib mengikuti prosedur keselamatan yang telah ditetapkan.

Penggunaan alat pelindung diri seperti *safety helmet*, *safety shoes*, sarung tangan isolasi, kacamata keselamatan, dan *face shield* menjadi persyaratan dasar dalam pekerjaan inspeksi. Selain itu, penerapan prosedur *Lock Out Tag Out* (LOTO) sangat penting untuk memastikan sumber energi telah diisolasi sebelum pekerjaan dilakukan.

Secara keseluruhan, inspeksi kelistrikan merupakan bagian penting dari sistem pemeliharaan industri yang bertujuan menjaga keandalan, keselamatan, dan efisiensi operasional. Melalui pemeriksaan yang terencana dan berkelanjutan, potensi gangguan dapat dideteksi lebih awal sehingga risiko kerusakan peralatan dan gangguan produksi dapat diminimalkan.

5.3 Wiring Diagram

5.3.1 Pengertian dan Fungsi *Wiring Diagram*

Wiring diagram merupakan gambar teknik yang menunjukkan hubungan antar komponen listrik beserta jalur pengkabelan yang digunakan dalam suatu sistem kelistrikan. Diagram ini berfungsi sebagai pedoman dalam proses pemasangan, pemeriksaan, perawatan, dan perbaikan instalasi listrik sehingga setiap komponen dapat terhubung sesuai dengan desain yang telah direncanakan. Dalam dunia industri, *wiring diagram* menjadi dokumen penting karena membantu teknisi memahami konfigurasi sistem secara cepat dan akurat.

Keberadaan *wiring diagram* sangat penting untuk mengurangi kesalahan pemasangan serta mempermudah proses *troubleshooting* ketika terjadi gangguan pada sistem. Melalui diagram tersebut, teknisi dapat mengetahui posisi komponen, jalur kabel, sumber daya listrik, serta hubungan antara perangkat kontrol dan perangkat tenaga. Dengan demikian, proses identifikasi masalah dapat dilakukan secara lebih efisien dan sistematis.

Selain digunakan dalam instalasi baru, *wiring diagram* juga berperan sebagai dokumen referensi selama masa operasional peralatan. Setiap perubahan atau pengembangan sistem sebaiknya dicatat dan diperbarui dalam diagram agar informasi teknis tetap sesuai dengan kondisi aktual di lapangan (Gönen, 2023).

5.3.2 Standarisasi Penandaan dan Warna Kabel

Dalam penyusunan *wiring diagram*, penggunaan standar penandaan dan warna kabel sangat penting untuk memastikan keseragaman interpretasi di antara teknisi maupun insinyur. Standar instalasi listrik di Indonesia mengacu pada Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL) yang mengatur identifikasi konduktor berdasarkan fungsi dan warna tertentu. Pada sistem tiga fasa, setiap penghantar memiliki warna khusus untuk membedakan fasa, netral, dan pembumian sehingga risiko kesalahan sambungan dapat diminimalkan.

Selain standar warna kabel, sistem industri modern juga banyak menggunakan standar IEC 81346-2 untuk penandaan fungsi dan klasifikasi komponen listrik. Dalam standar ini, setiap perangkat diberi kode huruf sesuai fungsi utamanya, seperti huruf F untuk perangkat proteksi, K untuk relay atau kontaktor, M untuk motor, dan X untuk terminal koneksi. Standarisasi tersebut memudahkan pembacaan diagram serta meningkatkan konsistensi dokumentasi teknik pada berbagai jenis instalasi industri.

Penerapan standar yang konsisten membantu mempercepat proses inspeksi, perawatan, dan modifikasi sistem kelistrikan. Selain itu, penggunaan standar internasional juga memudahkan koordinasi

antarpersonel teknis yang berasal dari latar belakang dan organisasi yang berbeda.

5.3.3 Komponen Utama dalam Wiring Diagram

Sebuah *wiring diagram* umumnya memuat berbagai komponen yang terdapat dalam sistem kelistrikan. Komponen tersebut meliputi sumber daya listrik, perangkat proteksi, sakelar, relay, kontaktor, motor listrik, sensor, terminal, serta berbagai perangkat kontrol lainnya. Setiap komponen digambarkan menggunakan simbol standar agar mudah dikenali dan dipahami oleh pengguna diagram.

Pada sistem industri, *wiring diagram* sering digunakan untuk menggambarkan hubungan antara panel distribusi, *Programmable Logic Controller* (PLC), sensor, aktuator, dan motor penggerak. Diagram tersebut menunjukkan bagaimana sinyal kontrol dan daya listrik mengalir dari satu komponen ke komponen lainnya sehingga sistem dapat beroperasi sesuai fungsi yang diinginkan.

Selain menunjukkan hubungan antarperangkat, *wiring diagram* juga memberikan informasi mengenai nomor terminal, kode kabel, ukuran penghantar, dan identifikasi peralatan. Informasi ini sangat membantu ketika dilakukan pemeriksaan maupun penggantian komponen karena teknisi dapat melacak koneksi dengan lebih cepat dan akurat (Petruszella, 2024).

5.3.4 Peran Wiring Diagram dalam Pemeriksaan dan Perawatan Sistem Kelistrikan

Dalam kegiatan pemeriksaan dan perawatan sistem kelistrikan, *wiring diagram* berfungsi sebagai panduan utama untuk

memastikan seluruh rangkaian bekerja sesuai desain. Ketika terjadi gangguan seperti hubungan singkat, kabel putus, atau kegagalan komponen kontrol, teknisi dapat menggunakan diagram untuk menelusuri jalur listrik dan menentukan lokasi masalah secara sistematis.

Wiring diagram juga mendukung kegiatan inspeksi berkala dengan membantu teknisi memverifikasi kondisi koneksi, terminal, dan perangkat listrik lainnya. Melalui pencocokan antara kondisi aktual di lapangan dan informasi pada diagram, potensi kesalahan instalasi maupun perubahan yang tidak terdokumentasi dapat segera diketahui.

Selain itu, keberadaan *wiring diagram* meningkatkan aspek keselamatan kerja karena teknisi dapat memahami konfigurasi sistem sebelum melakukan pekerjaan pemeliharaan. Dengan informasi yang lengkap mengenai sumber daya listrik dan jalur penghantar, risiko kesalahan operasi dapat diminimalkan. Oleh karena itu, *wiring diagram* tidak hanya berfungsi sebagai dokumen teknis, tetapi juga sebagai sarana penting dalam menjaga keandalan, efisiensi, dan keselamatan sistem kelistrikan industri.

5.4 Troubleshooting Dasar

5.4.1 Konsep Dasar Troubleshooting Sistem Kelistrikan

Troubleshooting merupakan proses identifikasi, analisis, dan penyelesaian gangguan yang terjadi pada suatu sistem atau peralatan. Dalam sistem kelistrikan industri, *troubleshooting*

dilakukan untuk menemukan penyebab kerusakan atau ketidaknormalan operasi sehingga tindakan perbaikan dapat dilakukan secara cepat dan tepat. Kemampuan melakukan *troubleshooting* menjadi salah satu kompetensi penting bagi operator maupun teknisi karena dapat membantu mengurangi waktu henti (*downtime*) dan menjaga kontinuitas proses produksi.

Proses *troubleshooting* yang efektif harus dilakukan secara sistematis dan berdasarkan data yang akurat. Langkah awal biasanya dimulai dengan mengidentifikasi gejala gangguan yang muncul, seperti motor tidak beroperasi, panel mengalami *trip*, tegangan tidak stabil, atau munculnya indikasi panas berlebih pada komponen listrik. Setelah gejala dikenali, dilakukan pemeriksaan terhadap komponen yang berpotensi menjadi sumber masalah hingga ditemukan penyebab utama gangguan.

Dalam konsep *Autonomous Maintenance*, operator memiliki peran penting dalam mendeteksi kondisi abnormal sejak dini melalui kegiatan inspeksi harian, pengamatan visual, pendengaran, dan pemeriksaan sederhana lainnya. Pendekatan ini memungkinkan gangguan diketahui sebelum berkembang menjadi kerusakan yang lebih serius sehingga keandalan peralatan dapat dipertahankan (Sulistyanto & Artanto, 2026).

5.4.2 Langkah-Langkah Troubleshooting Dasar

Pelaksanaan *troubleshooting* harus diawali dengan penerapan prosedur keselamatan kerja. Sebelum melakukan pemeriksaan, operator atau teknisi wajib memastikan sumber energi telah diamankan sesuai prosedur *Lock Out Tag Out* (LOTO).

Langkah ini bertujuan mencegah terjadinya kecelakaan akibat peralatan yang masih bertegangan atau aktif selama proses pemeriksaan berlangsung. Selain itu, penggunaan alat pelindung diri yang sesuai juga menjadi persyaratan penting dalam pekerjaan kelistrikan.

Setelah kondisi aman dipastikan, pemeriksaan dapat dilakukan secara bertahap. Tahap pertama adalah *visual inspection*, yaitu pemeriksaan tanpa alat ukur untuk mendeteksi indikasi kerusakan seperti kabel terkelupas, terminal longgar, korosi, bekas terbakar, atau perubahan warna komponen. Pemeriksaan visual sering kali mampu mengidentifikasi penyebab gangguan yang sederhana namun berdampak besar terhadap kinerja sistem.

Apabila gangguan belum ditemukan, langkah berikutnya adalah melakukan *mechanical inspection* dan *electrical measurement*. Pemeriksaan mekanis meliputi pengecekan kekencangan terminal, kondisi konektor, pemasangan komponen, dan sistem pendingin. Sementara itu, pengukuran kelistrikan dilakukan menggunakan alat ukur seperti multimeter, *clamp meter*, atau *insulation tester* untuk memeriksa parameter tegangan, arus, resistansi, frekuensi, dan tahanan isolasi. Pendekatan bertahap ini membantu mempersempit area gangguan sehingga proses identifikasi menjadi lebih efektif dan efisien.

5.4.3 Penanganan Gangguan Kelistrikan yang Umum Terjadi

Beberapa gangguan yang sering ditemukan pada sistem kelistrikan industri antara lain motor tidak dapat beroperasi, *circuit breaker* sering mengalami *trip*, serta terjadinya panas berlebih pada

panel listrik. Pada kasus motor yang tidak dapat beroperasi, pemeriksaan biasanya dilakukan terhadap sumber tegangan, kondisi kontaktor, *overload relay*, serta kemungkinan kerusakan pada motor itu sendiri. Gangguan pada salah satu komponen tersebut dapat menyebabkan motor gagal melakukan proses *starting*.

Gangguan lain yang sering terjadi adalah *trip* berulang pada MCB atau MCCB. Kondisi ini dapat disebabkan oleh beban berlebih (*overload*), hubung singkat (*short circuit*), atau kebocoran arus ke tanah (*ground fault*). Oleh karena itu, analisis terhadap pola gangguan dan hasil pengukuran arus sangat diperlukan untuk menentukan penyebab yang sebenarnya. Tindakan perbaikan yang tepat akan membantu mencegah terulangnya gangguan yang sama di masa mendatang.

Selain itu, panas berlebih pada panel listrik juga menjadi indikasi adanya masalah pada sistem. Kondisi ini umumnya disebabkan oleh terminal yang longgar, beban yang melebihi kapasitas, ventilasi yang buruk, atau adanya komponen yang mulai mengalami kerusakan. Untuk mendeteksi kondisi tersebut, pemeriksaan menggunakan *thermal camera* dapat dilakukan sehingga titik panas abnormal dapat diidentifikasi lebih awal (Sulistyanto & Artanto, 2026). Dengan penerapan *troubleshooting* yang sistematis dan berbasis inspeksi rutin, gangguan kelistrikan dapat ditangani secara lebih cepat sehingga keandalan sistem dan produktivitas operasional tetap terjaga.

Bab 6: Dasar-Dasar Instrumentasi

Ir. Antonius Hendro Noviyanto, M.T.

6.1 Variabel Proses

6.1.1 Pengertian Variabel Proses

Variabel proses merupakan besaran fisik atau kimia yang diukur, dipantau, dan dikendalikan dalam suatu sistem industri untuk memastikan proses produksi berjalan sesuai dengan kondisi yang telah ditetapkan. Variabel ini menjadi dasar bagi sistem instrumentasi dalam memperoleh informasi mengenai kondisi aktual suatu proses sehingga tindakan pengendalian dapat dilakukan secara tepat. Sensor digunakan untuk mendeteksi perubahan variabel proses dan mengubahnya menjadi sinyal listrik yang dapat diproses oleh sistem kontrol (Siswoyo & Noviyanto, 2026).

Dalam lingkungan industri modern, variabel proses memiliki peran yang sangat penting karena menjadi indikator utama yang menggambarkan performa suatu sistem. Informasi yang diperoleh dari pengukuran variabel proses digunakan untuk meningkatkan kualitas produk, menjaga keselamatan operasi, mengoptimalkan penggunaan energi, serta meminimalkan risiko kegagalan peralatan. Oleh karena itu, pemahaman mengenai variabel proses merupakan fondasi utama dalam bidang instrumentasi dan otomasi industri.

Sistem instrumentasi pada umumnya terdiri atas sensor, transduser, pengendali, dan aktuator yang bekerja secara terintegrasi. Variabel proses yang terukur akan dikonversi menjadi sinyal tertentu, kemudian dianalisis oleh pengendali untuk menentukan tindakan yang diperlukan agar kondisi proses tetap berada pada nilai yang diinginkan.

6.1.2 Jenis-Jenis Variabel Proses

Variabel proses dalam dunia industri dapat dibedakan berdasarkan besaran yang diukur. Masing-masing variabel memiliki karakteristik dan metode pengukuran yang berbeda sesuai kebutuhan aplikasi.

1. Suhu (*Temperature*)

Suhu merupakan salah satu variabel proses yang paling sering diukur dalam sistem industri. Pengukuran suhu diperlukan untuk menjaga kualitas produk dan kestabilan proses produksi. Berbagai jenis sensor dapat digunakan untuk mengukur suhu, seperti LM35, thermistor, RTD/PT100, dan thermocouple. Setiap sensor memiliki karakteristik tersendiri terkait rentang pengukuran, sensitivitas, dan tingkat ketelitian (Siswoyo & Noviyanto, 2026).

Pengendalian suhu banyak diterapkan pada industri makanan, farmasi, kimia, pembangkit listrik, dan manufaktur. Ketepatan pengukuran suhu sangat menentukan keberhasilan proses produksi serta keamanan operasi peralatan.

2. Tekanan (*Pressure*)

Tekanan merupakan gaya yang bekerja pada satuan luas tertentu. Variabel ini digunakan untuk memantau kondisi fluida

dalam pipa, tangki, maupun sistem perpipaan industri. Pengukuran tekanan membantu operator memastikan bahwa proses berlangsung dalam batas operasi yang aman dan sesuai spesifikasi desain.

Sensor tekanan umumnya menghasilkan sinyal keluaran yang sebanding dengan besarnya tekanan yang diterima. Hasil pengukuran tersebut kemudian digunakan untuk pengendalian maupun sistem proteksi peralatan.

3. Level (*Level*)

Level menunjukkan tinggi atau jumlah material yang terdapat di dalam suatu wadah. Pengukuran level sangat penting dalam pengelolaan tangki penyimpanan, reaktor, maupun silo. Sensor kapasitif sering digunakan untuk mendeteksi perubahan level cairan melalui perubahan nilai kapasitansi yang terjadi akibat perubahan volume bahan yang diukur (Siswoyo & Noviyanto, 2026).

Pengukuran level yang akurat membantu mencegah terjadinya kondisi *overflow*, kekosongan tangki, maupun gangguan proses yang dapat memengaruhi kontinuitas produksi.

6.1.3 Variabel Posisi dan Deteksi Objek

Selain variabel proses yang berkaitan dengan fluida dan temperatur, sistem instrumentasi juga banyak digunakan untuk mendeteksi posisi dan keberadaan objek pada proses manufaktur otomatis.

1. Posisi dan Perpindahan (*Position and Displacement*)

Variabel posisi digunakan untuk menentukan lokasi atau pergerakan suatu objek terhadap titik referensi tertentu. Pengukuran

posisi banyak diterapkan pada sistem robotik, mesin CNC, dan peralatan otomasi industri lainnya. Salah satu sensor yang umum digunakan adalah *rotary encoder*, yaitu sensor yang mengubah gerakan rotasi menjadi sinyal digital sehingga posisi dan arah putaran dapat diketahui dengan tingkat akurasi yang tinggi (Siswoyo & Noviyanto, 2026).

Informasi posisi yang akurat memungkinkan sistem otomasi bekerja secara presisi dan menghasilkan kualitas produk yang konsisten.

2. Deteksi Keberadaan Objek (*Object Detection*)

Deteksi objek bertujuan mengetahui ada atau tidaknya suatu benda pada area tertentu. Sensor induktif digunakan untuk mendeteksi objek logam tanpa kontak langsung, sedangkan sensor kapasitif dapat mendeteksi benda logam maupun nonlogam. Selain itu, sensor photoelektrik memanfaatkan cahaya untuk mendeteksi keberadaan objek melalui perubahan intensitas cahaya yang diterima sensor (Siswoyo & Noviyanto, 2026).

Teknologi deteksi objek banyak dimanfaatkan pada sistem konveyor, mesin pengemasan, sistem penyortiran otomatis, dan aplikasi industri lainnya yang membutuhkan kecepatan serta ketelitian tinggi.

6.1.4 Karakteristik Pengukuran Variabel Proses

Keberhasilan pengukuran variabel proses tidak hanya ditentukan oleh jenis sensor yang digunakan, tetapi juga oleh kualitas pengukurannya. Beberapa karakteristik penting dalam pengukuran meliputi akurasi, presisi, resolusi, *repeatability*, rentang

ukur (*range*), sensitivitas, linearitas, dan *response time* (Siswoyo & Noviyanto, 2026).

Akurasi menunjukkan tingkat kedekatan hasil pengukuran terhadap nilai sebenarnya, sedangkan presisi menggambarkan konsistensi hasil pengukuran yang dilakukan secara berulang. Resolusi menunjukkan perubahan terkecil yang masih dapat dideteksi oleh sensor, sementara sensitivitas menggambarkan kemampuan sensor menghasilkan perubahan keluaran akibat perubahan masukan.

Karakteristik-karakteristik tersebut sangat penting karena memengaruhi kualitas informasi yang diterima oleh sistem kontrol. Semakin baik karakteristik sensor yang digunakan, semakin tinggi pula kemampuan sistem instrumentasi dalam melakukan pemantauan dan pengendalian proses secara efektif.

6.2 Sistem Pengukuran

6.2.1 Pengertian Sistem Pengukuran

Sistem pengukuran merupakan suatu rangkaian komponen yang digunakan untuk memperoleh informasi mengenai nilai suatu besaran fisik dan mengubahnya menjadi data yang dapat dibaca, ditampilkan, atau digunakan dalam proses pengendalian. Dalam sistem instrumentasi, pengukuran berfungsi sebagai dasar untuk memantau kondisi proses, mengevaluasi kinerja peralatan, serta mendukung pengambilan keputusan dalam sistem otomasi industri. Sistem pengukuran umumnya terdiri atas sensor, transduser,

pengolah sinyal, media transmisi, dan perangkat penampil hasil pengukuran (Siswoyo & Noviyanto, 2026).

6.2.2 Komponen Sistem Pengukuran

Komponen utama dalam sistem pengukuran meliputi sensor sebagai elemen pengindra, transduser sebagai pengubah energi fisik menjadi sinyal listrik, rangkaian pengondisi sinyal (*signal conditioning*), media transmisi data, dan perangkat penampil atau pengendali. Sensor berfungsi mendeteksi perubahan besaran fisik seperti suhu, tekanan, posisi, cahaya, maupun jarak. Sinyal yang dihasilkan kemudian diproses agar dapat digunakan oleh sistem kontrol maupun sistem pemantauan.

Selain itu, sistem pengukuran modern sering diintegrasikan dengan *Programmable Logic Controller* (PLC), *Human Machine Interface* (HMI), dan sistem akuisisi data sehingga proses pemantauan dapat dilakukan secara otomatis dan real-time. Integrasi tersebut memungkinkan peningkatan efisiensi dan keandalan proses industri.

6.2.3 Prinsip Kerja Sistem Pengukuran

Prinsip kerja sistem pengukuran dimulai ketika sensor mendeteksi perubahan suatu besaran fisik. Perubahan tersebut kemudian diubah menjadi sinyal listrik yang dapat diolah lebih lanjut. Sebagai contoh, sensor suhu LM35 menghasilkan perubahan tegangan yang sebanding dengan perubahan suhu sehingga nilai suhu dapat ditampilkan dalam bentuk data yang mudah dibaca.

Sinyal keluaran sensor dapat berupa sinyal analog maupun digital. Sensor analog menghasilkan sinyal kontinu yang nilainya

berubah secara proporsional terhadap besaran yang diukur, sedangkan sensor digital menghasilkan sinyal diskrit dalam bentuk kondisi ON atau OFF. Setelah diproses oleh sistem pengolah sinyal, informasi tersebut dapat digunakan untuk keperluan monitoring maupun pengendalian proses.

6.2.4 Karakteristik Sistem Pengukuran

Kualitas suatu sistem pengukuran ditentukan oleh sejumlah karakteristik penting. Karakteristik tersebut meliputi akurasi (*accuracy*), presisi (*precision*), resolusi (*resolution*), *repeatability*, rentang ukur (*range*), sensitivitas (*sensitivity*), linearitas (*linearity*), *dead band*, *dead time*, dan *response time*.

Akurasi menunjukkan tingkat kedekatan hasil pengukuran terhadap nilai sebenarnya, sedangkan presisi menunjukkan konsistensi hasil pengukuran yang dilakukan secara berulang. Resolusi menggambarkan perubahan terkecil yang masih dapat dideteksi oleh alat ukur, sementara sensitivitas menunjukkan kemampuan sensor merespons perubahan masukan. Karakteristik tersebut menjadi parameter utama dalam menentukan performa sistem pengukuran pada aplikasi industri (Siswoyo & Noviyanto, 2026).

6.2.5 Sistem Pengukuran dalam Industri

Sistem pengukuran memiliki peran yang sangat penting dalam berbagai sektor industri. Pada industri manufaktur, sensor fotoelektrik digunakan untuk mendeteksi keberadaan produk pada jalur produksi, sedangkan sensor induktif digunakan untuk mendeteksi objek logam tanpa kontak langsung. Dalam industri

proses, sensor suhu seperti RTD PT100 dan termokopel digunakan untuk memantau kondisi operasi peralatan yang bekerja pada temperatur tinggi.

Selain itu, sensor kapasitif banyak digunakan untuk mengukur level cairan dalam tangki penyimpanan, sedangkan *rotary encoder* digunakan untuk mengukur posisi dan kecepatan putaran motor. Pemilihan sistem pengukuran yang tepat akan meningkatkan kualitas produk, efisiensi proses, serta keselamatan operasional.

6.2.6 Pentingnya Kalibrasi dalam Sistem Pengukuran

Kalibrasi merupakan proses membandingkan hasil pengukuran suatu instrumen dengan standar acuan yang memiliki tingkat ketelitian lebih tinggi. Tujuan utama kalibrasi adalah memastikan bahwa instrumen masih memberikan hasil pengukuran yang akurat dan sesuai dengan spesifikasi yang ditetapkan.

Pelaksanaan kalibrasi secara berkala dapat mengurangi kesalahan pengukuran, meningkatkan keandalan data, serta menjamin mutu proses produksi. Oleh karena itu, kalibrasi menjadi bagian penting dalam sistem pengukuran modern untuk menjaga konsistensi dan validitas hasil pengukuran yang diperoleh (Bentley, 2021).

6.3 Sensor dan Transduser

6.3.1 Pengertian Sensor dan Transduser

Sensor dan transduser merupakan komponen utama dalam sistem instrumentasi yang berfungsi untuk memperoleh informasi dari suatu proses atau lingkungan. Sensor adalah perangkat yang digunakan untuk mendeteksi perubahan besaran fisik, kimia, maupun mekanik, seperti suhu, tekanan, cahaya, kelembapan, jarak, dan posisi. Sementara itu, transduser merupakan perangkat yang berfungsi mengubah suatu bentuk energi menjadi bentuk energi lainnya sehingga informasi yang diterima dari lingkungan dapat diproses oleh sistem kontrol. Dalam sistem otomasi industri, sensor berperan sebagai penghubung antara kondisi fisik di lapangan dengan perangkat pengendali seperti *Programmable Logic Controller* (PLC), mikrokontroler, maupun komputer industri. Melalui sensor dan transduser, berbagai variabel proses dapat dipantau secara real-time sehingga pengendalian sistem dapat dilakukan secara lebih akurat dan efisien (Morris & Langari, 2021).

Pada praktiknya, sensor sering kali menjadi bagian dari suatu transduser. Ketika suatu besaran fisik terdeteksi, transduser akan mengubah informasi tersebut menjadi sinyal listrik yang dapat dibaca dan diolah oleh perangkat elektronik. Oleh karena itu, keberadaan sensor dan transduser menjadi sangat penting dalam berbagai bidang industri modern, mulai dari manufaktur, energi, transportasi, hingga sistem otomasi cerdas.

6.3.2 Prinsip Kerja Sensor dan Transduser

Prinsip kerja sensor dan transduser didasarkan pada kemampuan material atau komponen tertentu untuk merespons perubahan kondisi lingkungan. Ketika terjadi perubahan pada variabel yang diukur, seperti kenaikan suhu atau perubahan posisi benda, sensor akan menghasilkan perubahan karakteristik tertentu, misalnya perubahan resistansi, kapasitansi, induktansi, arus, atau tegangan listrik. Perubahan tersebut kemudian diubah menjadi sinyal keluaran yang dapat diproses oleh sistem pengendali.

Secara umum, proses kerja sensor terdiri atas tiga tahapan utama. Tahap pertama adalah pendeteksian besaran fisik yang terjadi pada lingkungan. Tahap kedua adalah proses konversi energi, yaitu mengubah besaran fisik menjadi sinyal listrik yang sesuai. Tahap ketiga adalah pengolahan sinyal agar informasi yang dihasilkan dapat digunakan untuk keperluan pemantauan, pengukuran, atau pengendalian proses. Berdasarkan karakteristik keluarannya, sensor dapat dibedakan menjadi sensor analog dan sensor digital. Sensor analog menghasilkan sinyal kontinu yang nilainya berubah secara proporsional terhadap besaran yang diukur, sedangkan sensor digital menghasilkan keluaran berupa kondisi logika tertentu, seperti ON dan OFF, yang umum digunakan dalam sistem otomasi industri.

6.3.3 Jenis-Jenis Sensor dan Transduser

Sensor dan transduser memiliki berbagai jenis yang disesuaikan dengan kebutuhan pengukuran dalam suatu sistem. Berdasarkan sumber energinya, sensor dapat dibedakan menjadi sensor aktif dan sensor pasif. Sensor aktif memerlukan sumber daya

eksternal untuk dapat beroperasi, sedangkan sensor pasif memperoleh energi dari fenomena fisik yang dideteksi. Contoh sensor aktif adalah LM35 yang membutuhkan suplai tegangan untuk menghasilkan sinyal keluaran berupa tegangan yang sebanding dengan suhu. Sebaliknya, *Light Dependent Resistor* (LDR) merupakan contoh sensor pasif yang memanfaatkan perubahan intensitas cahaya untuk menghasilkan perubahan resistansi.

Berdasarkan objek yang diukur, sensor dapat dikelompokkan menjadi sensor suhu, sensor posisi, sensor tekanan, sensor cahaya, sensor jarak, dan sensor keberadaan objek. Sensor suhu yang banyak digunakan dalam industri antara lain LM35, thermistor, RTD PT100, dan thermocouple. Untuk mendeteksi keberadaan objek tanpa kontak langsung digunakan sensor induktif, sensor kapasitif, dan sensor fotoelektrik. Sensor induktif umumnya digunakan untuk mendeteksi benda logam, sedangkan sensor kapasitif mampu mendeteksi benda logam maupun nonlogam. Sensor fotoelektrik memanfaatkan cahaya sebagai media pendeteksian sehingga banyak digunakan pada sistem konveyor dan proses otomatisasi produksi. Selain itu, terdapat pula *rotary encoder* yang digunakan untuk mendeteksi posisi dan pergerakan rotasi suatu poros dalam sistem kendali gerak.

6.3.4 Karakteristik Sensor dan Transduser

Kinerja sensor dan transduser ditentukan oleh sejumlah karakteristik yang memengaruhi kualitas hasil pengukuran. Salah satu karakteristik yang paling penting adalah akurasi, yaitu tingkat kedekatan hasil pengukuran terhadap nilai sebenarnya. Selain

akurasi, terdapat pula presisi yang menunjukkan kemampuan sensor menghasilkan nilai yang konsisten pada pengukuran berulang dalam kondisi yang sama. Sensor yang baik tidak hanya memiliki akurasi tinggi, tetapi juga mampu memberikan hasil yang stabil dan berulang.

Karakteristik lainnya adalah sensitivitas, yaitu kemampuan sensor merespons perubahan masukan yang kecil. Sensor dengan sensitivitas tinggi mampu mendeteksi perubahan variabel yang sangat kecil sehingga cocok digunakan pada aplikasi yang memerlukan tingkat ketelitian tinggi. Linearitas juga menjadi parameter penting karena menunjukkan hubungan antara sinyal masukan dan keluaran. Semakin linear hubungan tersebut, semakin mudah proses kalibrasi dan interpretasi hasil pengukuran. Selain itu, terdapat parameter resolusi yang menunjukkan perubahan terkecil yang masih dapat dideteksi oleh sensor, serta *response time* yang menggambarkan kecepatan sensor dalam merespons perubahan kondisi lingkungan. Karakteristik-karakteristik tersebut menjadi dasar dalam pemilihan sensor yang sesuai dengan kebutuhan aplikasi industri (Doebelin & Manik, 2019).

6.3.5 Penerapan Sensor dan Transduser dalam Industri

Perkembangan teknologi industri modern tidak dapat dilepaskan dari penggunaan sensor dan transduser. Dalam industri manufaktur, sensor fotoelektrik digunakan untuk mendeteksi keberadaan produk pada jalur konveyor, sedangkan sensor kapasitif digunakan untuk memantau ketinggian cairan dalam tangki penyimpanan. Pada industri otomotif, sensor induktif dimanfaatkan

untuk mendeteksi posisi komponen logam dalam proses perakitan, thermistor digunakan untuk mengukur temperatur udara masuk mesin, dan *rotary encoder* digunakan untuk mengontrol posisi robot industri.

Dalam industri proses, sensor suhu seperti RTD PT100 dan thermocouple banyak digunakan untuk memantau temperatur pada *heat exchanger*, boiler, tungku pemanas, dan reaktor kimia. Data yang diperoleh dari sensor tersebut digunakan sebagai dasar pengendalian proses agar kualitas produk tetap terjaga dan operasi sistem berlangsung secara aman. Penggunaan sensor dan transduser juga semakin berkembang pada sistem *smart manufacturing*, *Internet of Things (IoT)*, dan otomasi berbasis kecerdasan buatan yang menuntut kemampuan pengukuran secara cepat, akurat, dan berkelanjutan. Dengan demikian, sensor dan transduser menjadi elemen yang sangat penting dalam mendukung efisiensi, produktivitas, dan keandalan sistem industri modern.

6.4 Akurasi dan Presisi

6.4.1 Pengertian Akurasi

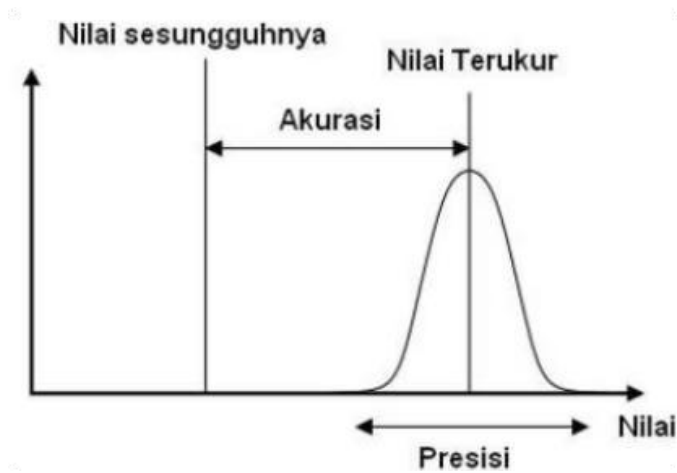
Akurasi (*accuracy*) merupakan tingkat kedekatan antara hasil pengukuran yang diperoleh oleh suatu sensor atau instrumen dengan nilai sebenarnya dari besaran yang diukur. Parameter ini menunjukkan seberapa tepat suatu alat dalam merepresentasikan kondisi nyata pada objek pengukuran. Semakin kecil selisih antara hasil pengukuran dan nilai sebenarnya, maka semakin tinggi tingkat

akurasi instrumen tersebut. Dalam sistem instrumentasi industri, akurasi menjadi faktor yang sangat penting karena kesalahan pengukuran dapat memengaruhi kualitas produk, efektivitas proses produksi, dan keselamatan operasional. Sebagai contoh, apabila suhu sebenarnya suatu proses adalah 100°C dan sensor menunjukkan nilai $99,9^{\circ}\text{C}$, maka kesalahan pengukurannya hanya sebesar $0,1^{\circ}\text{C}$ sehingga sensor tersebut memiliki tingkat akurasi yang tinggi (Siswoyo & Noviyanto, 2026).

6.4.2 Pengertian Presisi

Presisi (*precision*) adalah kemampuan suatu instrumen untuk menghasilkan nilai pengukuran yang konsisten ketika dilakukan pengukuran berulang pada kondisi yang sama. Presisi tidak berkaitan langsung dengan kedekatan terhadap nilai sebenarnya, melainkan menunjukkan tingkat keseragaman hasil pengukuran. Instrumen yang memiliki presisi tinggi akan menghasilkan data yang relatif sama atau memiliki penyimpangan yang sangat kecil dari satu pengukuran ke pengukuran lainnya. Sebagai ilustrasi, suatu sensor suhu yang menghasilkan pembacaan berturut-turut sebesar $24,8^{\circ}\text{C}$, $24,9^{\circ}\text{C}$, $24,8^{\circ}\text{C}$, $24,9^{\circ}\text{C}$, dan $24,8^{\circ}\text{C}$ dapat dikatakan memiliki presisi yang tinggi karena variasi hasil pengukurannya sangat kecil. Dalam aplikasi industri, presisi yang baik diperlukan agar sistem kontrol dapat bekerja secara stabil dan mampu merespons perubahan proses secara konsisten (Siswoyo & Noviyanto, 2026).

6.4.3 Hubungan Akurasi dan Presisi dalam Instrumentasi



Gambar 6.1. Akurasi dan Presisi

Akurasi dan presisi merupakan dua karakteristik yang berbeda namun saling berkaitan dalam menentukan kualitas suatu sistem pengukuran. Sebuah instrumen dapat memiliki presisi tinggi tetapi akurasi rendah apabila hasil pengukurannya selalu konsisten namun jauh dari nilai sebenarnya. Sebaliknya, instrumen dapat memiliki akurasi yang baik tetapi presisi rendah apabila hasil pengukuran berada di sekitar nilai sebenarnya namun memiliki variasi yang besar pada setiap pengukuran. Oleh karena itu, kualitas sensor yang baik harus mampu menghasilkan pengukuran yang tidak hanya mendekati nilai sebenarnya, tetapi juga konsisten ketika digunakan secara berulang. Dalam lingkungan industri, kedua parameter ini menjadi dasar dalam proses kalibrasi dan evaluasi performa instrumen untuk memastikan bahwa data yang diperoleh dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan operasional yang tepat.

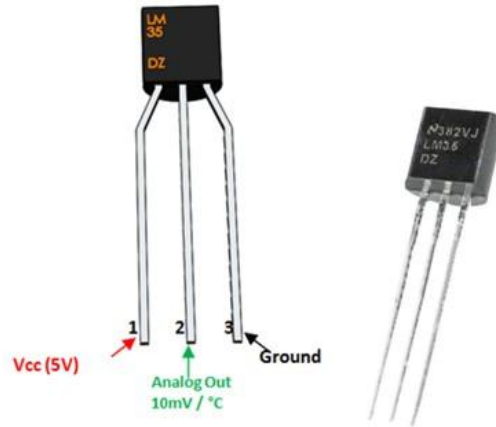
Bab 7: Sensor dan Sistem Pengukuran Industri

Ir. Agus Siswoyo, S.T., M.T.

7.1 Sensor Suhu

7.1.1 Pengertian Sensor Suhu

Sensor suhu merupakan perangkat instrumentasi yang digunakan untuk mendeteksi perubahan temperatur pada suatu objek atau lingkungan dan mengubahnya menjadi sinyal yang dapat diukur serta diproses oleh sistem kontrol. Dalam sistem industri modern, sensor suhu menjadi salah satu instrumen yang paling banyak digunakan karena temperatur merupakan parameter penting yang memengaruhi kualitas produk, efisiensi proses, dan keselamatan operasi. Sensor bekerja dengan mendeteksi perubahan sifat fisik tertentu akibat perubahan suhu, kemudian mengubah perubahan tersebut menjadi sinyal listrik yang dapat dibaca oleh pengendali maupun perangkat pemantauan (Siswoyo, 2026).



Gambar 7.1. Sensor suhu

Sumber: <https://share.google/6AcYOf605Q424AAKu>

Pengukuran suhu memiliki peranan penting dalam berbagai sektor industri, seperti industri makanan, farmasi, petrokimia, manufaktur, dan pembangkitan energi. Ketepatan pengukuran temperatur memungkinkan operator menjaga kondisi proses tetap berada pada batas operasi yang telah ditentukan. Oleh karena itu, pemilihan sensor suhu yang sesuai menjadi faktor penting untuk memperoleh hasil pengukuran yang akurat dan andal.

7.1.2 Sensor RTD (*Resistance Temperature Detector*)

Salah satu jenis sensor suhu yang banyak digunakan dalam industri adalah *Resistance Temperature Detector* (RTD). Sensor ini bekerja berdasarkan prinsip perubahan hambatan listrik suatu material terhadap perubahan temperatur. Ketika suhu meningkat atau menurun, nilai resistansi elemen sensor juga akan berubah sehingga dapat digunakan untuk menentukan besarnya temperatur yang diukur. Salah satu jenis RTD yang paling umum digunakan

adalah PT100 yang menggunakan platinum sebagai elemen pengindera karena memiliki stabilitas dan akurasi yang tinggi (Siswoyo, 2026).

Pada kondisi tertentu, perubahan suhu akan menyebabkan perubahan resistansi yang mengakibatkan perubahan tegangan keluaran pada rangkaian pengukuran. Perubahan tegangan tersebut kemudian diolah oleh sistem kontrol untuk menghasilkan nilai temperatur yang sesuai. RTD dikenal memiliki karakteristik linearitas yang baik serta tingkat ketelitian yang tinggi sehingga banyak digunakan pada proses industri yang memerlukan pengukuran temperatur secara presisi.

Berdasarkan konstruksinya, RTD dibedakan menjadi tipe *thin-film* dan *wire-wound*. Tipe *thin-film* dibuat menggunakan lapisan platinum tipis yang ditempatkan pada substrat tertentu, sedangkan tipe *wire-wound* menggunakan kawat platinum yang dililit dan ditempatkan dalam tabung keramik. Tipe *wire-wound* umumnya memberikan stabilitas yang lebih tinggi sehingga banyak digunakan pada aplikasi industri dan ilmiah yang membutuhkan akurasi tinggi (Siswoyo, 2026).

7.1.3 Sensor Thermocouple

Thermocouple merupakan sensor suhu yang bekerja berdasarkan efek Seebeck, yaitu fenomena munculnya tegangan listrik ketika dua logam berbeda disambungkan dan mengalami perbedaan temperatur. Tegangan yang dihasilkan oleh thermocouple sebanding dengan perbedaan suhu antara titik pengukuran dan titik

referensi sehingga dapat digunakan untuk menentukan nilai temperatur suatu proses (Siswoyo, 2026).

Keunggulan utama thermocouple adalah kemampuannya mengukur temperatur dalam rentang yang sangat luas. Selain itu, konstruksinya yang sederhana menjadikan sensor ini tahan terhadap kondisi lingkungan yang keras dan cocok digunakan pada aplikasi industri berat. Namun, tegangan keluaran thermocouple relatif kecil, hanya beberapa milivolt, sehingga diperlukan rangkaian penguat atau pengkondisi sinyal untuk memperoleh hasil pengukuran yang lebih akurat.

Dalam pengoperasiannya, thermocouple bekerja berdasarkan perbedaan temperatur antara sambungan panas (*hot junction*) dan sambungan referensi (*cold junction*). Ketika suhu pada sambungan panas berubah, tegangan listrik yang dihasilkan juga berubah sehingga sistem dapat menghitung temperatur yang terjadi. Karakteristik tersebut menjadikan thermocouple banyak digunakan pada tungku industri, sistem pembakaran, industri logam, serta berbagai aplikasi yang melibatkan temperatur tinggi (Siswoyo, 2026).

7.1.4 Aplikasi Sensor Suhu dalam Industri

Sensor suhu memiliki peranan yang sangat penting dalam sistem pengendalian proses industri. Salah satu contoh penerapannya adalah pada sistem pengontrolan temperatur gas bahan bakar dalam jaringan perpipaan industri. Dalam aplikasi tersebut, sensor RTD digunakan untuk mengawasi dan mengendalikan temperatur gas yang dipanaskan melalui *heat exchanger* agar tetap berada pada

kondisi operasi yang sesuai. Pengendalian temperatur yang baik memastikan proses produksi dapat berlangsung secara stabil dan efisien (Siswoyo, 2026).

Selain digunakan pada sistem perpipaan industri, sensor suhu juga banyak diterapkan pada sistem pemanas listrik, tungku pembakaran, boiler, sistem pendingin, reaktor kimia, dan berbagai peralatan proses lainnya. Data temperatur yang diperoleh sensor akan dikirimkan ke pengendali suhu seperti TK4S Autonics untuk dibandingkan dengan nilai yang telah ditentukan. Berdasarkan hasil perbandingan tersebut, sistem kontrol akan mengatur aktuator agar suhu proses tetap berada dalam rentang yang diinginkan.

Peningkatan penggunaan sistem otomasi dalam industri menyebabkan kebutuhan terhadap sensor suhu semakin besar. Sensor yang memiliki akurasi tinggi, respons cepat, dan stabilitas yang baik akan mendukung terciptanya sistem pengendalian yang lebih efektif. Oleh karena itu, pemahaman mengenai prinsip kerja dan karakteristik sensor suhu menjadi bagian penting dalam bidang instrumentasi dan sistem pengukuran industri.

7.2 Sensor Tekanan

7.2.1 Pengertian Sensor Tekanan

Sensor tekanan merupakan perangkat instrumentasi yang digunakan untuk mendeteksi dan mengukur besarnya tekanan yang bekerja pada suatu fluida, baik berupa gas maupun cairan. Sensor ini berfungsi mengubah besaran tekanan menjadi sinyal listrik yang

dapat diproses oleh sistem kontrol, sistem pemantauan, maupun perangkat elektronik lainnya. Dalam lingkungan industri modern, sensor tekanan menjadi salah satu instrumen yang sangat penting karena banyak proses produksi yang memerlukan pengendalian tekanan secara akurat untuk menjaga kualitas produk, efisiensi operasi, dan keselamatan kerja. Sensor tekanan termasuk ke dalam kelompok sensor yang digunakan untuk mengukur besaran fisik dan mengubahnya menjadi sinyal yang dapat dibaca oleh sistem elektronik (Siswoyo, 2026).

7.2.2 Prinsip Kerja Sensor Tekanan

Prinsip kerja sensor tekanan didasarkan pada perubahan karakteristik fisik suatu elemen pengindra akibat adanya tekanan yang diberikan. Ketika tekanan bekerja pada elemen sensor, akan terjadi perubahan bentuk, deformasi, resistansi, kapasitansi, maupun tegangan listrik yang kemudian dikonversi menjadi sinyal keluaran yang sebanding dengan tekanan yang diukur. Salah satu metode yang banyak digunakan adalah metode kapasitif, yaitu dengan memanfaatkan perubahan jarak antara dua pelat konduktor akibat tekanan yang bekerja pada membran sensor. Perubahan jarak tersebut menyebabkan perubahan nilai kapasitansi yang selanjutnya diubah menjadi sinyal listrik yang dapat diproses oleh sistem kontrol (Siswoyo, 2026).

Selain metode kapasitif, sensor tekanan juga dapat bekerja menggunakan teknologi *strain gauge*, piezoresistif, dan piezoelektrik. Setiap metode memiliki karakteristik yang berbeda dalam hal sensitivitas, rentang pengukuran, ketelitian, serta

kemampuan bekerja pada kondisi lingkungan tertentu. Oleh karena itu, pemilihan prinsip kerja sensor harus disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi yang akan digunakan.

7.2.3 Jenis-Jenis Sensor Tekanan

Sensor tekanan dapat dibedakan berdasarkan referensi tekanan yang digunakan dalam proses pengukurannya. Sensor tekanan absolut (*absolute pressure sensor*) mengukur tekanan terhadap kondisi vakum sempurna sehingga banyak digunakan pada aplikasi yang memerlukan pengukuran tekanan atmosfer dan sistem vakum. Sensor tekanan relatif (*gauge pressure sensor*) mengukur tekanan terhadap tekanan atmosfer sehingga menjadi jenis sensor yang paling umum digunakan pada sistem industri dan peralatan teknik.

Selain itu, terdapat sensor tekanan diferensial (*differential pressure sensor*) yang digunakan untuk mengukur perbedaan tekanan antara dua titik yang berbeda. Sensor jenis ini banyak dimanfaatkan dalam sistem pengukuran aliran fluida, pemantauan kondisi filter, serta pengawasan kinerja pompa dan kompresor. Keberagaman jenis sensor tekanan memberikan fleksibilitas bagi pengguna untuk memilih sensor yang paling sesuai dengan kebutuhan proses dan kondisi operasi yang dihadapi.

7.2.4 Aplikasi Sensor Tekanan dalam Industri

Penggunaan sensor tekanan dapat ditemukan pada hampir seluruh sektor industri. Dalam industri minyak dan gas, sensor tekanan digunakan untuk memantau tekanan pada pipa distribusi, tangki penyimpanan, serta peralatan proses lainnya guna menjaga

keamanan operasi. Pada industri manufaktur, sensor tekanan digunakan dalam sistem pneumatik dan hidrolik untuk memastikan tekanan kerja tetap berada dalam rentang yang ditentukan.

Sensor tekanan juga banyak digunakan dalam industri kimia, farmasi, makanan dan minuman, serta pembangkit tenaga listrik. Pada sistem kontrol proses, informasi tekanan digunakan sebagai parameter penting untuk mengatur aliran, temperatur, dan kondisi operasi peralatan. Modul sensor industri menjelaskan bahwa salah satu aplikasi sensor kapasitif adalah sebagai sensor tekanan dengan memanfaatkan membran yang mengalami deformasi akibat tekanan sehingga perubahan nilai kapasitansi dapat digunakan sebagai indikator besarnya tekanan yang diterima sensor (Siswoyo, 2026).

7.2.5 Karakteristik Sensor Tekanan

Kinerja sensor tekanan ditentukan oleh beberapa karakteristik penting yang memengaruhi kualitas hasil pengukuran. Karakteristik tersebut meliputi akurasi (*accuracy*), presisi (*precision*), sensitivitas (*sensitivity*), resolusi (*resolution*), linearitas (*linearity*), *repeatability*, rentang ukur (*range*), dan waktu tanggap (*response time*). Akurasi menunjukkan tingkat kedekatan hasil pengukuran terhadap nilai sebenarnya, sedangkan presisi menunjukkan konsistensi hasil pengukuran yang dilakukan berulang kali pada kondisi yang sama (Siswoyo, 2026).

Sensitivitas menggambarkan kemampuan sensor dalam merespons perubahan tekanan yang terjadi, sedangkan resolusi menunjukkan perubahan terkecil yang masih dapat dideteksi oleh sensor. Linearitas menunjukkan tingkat kesesuaian hubungan antara

tekanan masukan dan sinyal keluaran yang dihasilkan. Karakteristik-karakteristik tersebut harus diperhatikan dalam pemilihan sensor tekanan karena akan memengaruhi keandalan sistem pengukuran dan pengendalian yang digunakan dalam proses industri.

7.3 Sensor Proximity

7.3.1 Pengertian dan Fungsi Sensor *Proximity*

Sensor *proximity* merupakan perangkat sensor yang digunakan untuk mendeteksi keberadaan suatu objek tanpa memerlukan kontak fisik secara langsung. Sensor ini bekerja dengan memanfaatkan perubahan medan elektromagnetik, medan listrik, atau energi cahaya yang dipengaruhi oleh keberadaan objek di area pendeteksian. Dalam sistem otomasi industri, sensor *proximity* berfungsi sebagai alat pendeteksi posisi, penghitung produk, pengendali pergerakan material, serta pengaman proses produksi. Kemampuan mendeteksi objek tanpa sentuhan fisik menjadikan sensor ini lebih tahan terhadap keausan mekanis dibandingkan sakelar konvensional. Selain itu, sensor *proximity* mampu bekerja dengan cepat dan memiliki tingkat keandalan yang tinggi sehingga banyak digunakan pada sistem manufaktur modern, robotika, dan sistem kendali otomatis (Patranabis, 2023).



Gambar 7.2. sensor proximity

Sumber: <https://share.google/iq12ZYciF8jSUSuKE>

Penggunaan sensor *proximity* semakin meningkat seiring berkembangnya teknologi otomasi industri. Berbagai proses produksi membutuhkan sistem pendeteksian yang akurat untuk memastikan setiap tahapan berlangsung sesuai dengan parameter yang telah ditentukan. Oleh karena itu, sensor *proximity* menjadi salah satu komponen penting dalam mendukung efisiensi, produktivitas, dan keselamatan operasional di lingkungan industri.

7.3.2 Prinsip Kerja Sensor *Proximity*

Prinsip kerja sensor *proximity* bergantung pada jenis teknologi yang digunakan untuk mendeteksi objek. Salah satu jenis yang paling umum digunakan adalah sensor *proximity* induktif. Sensor ini memanfaatkan kumparan (*coil*) yang menghasilkan medan elektromagnetik frekuensi tinggi. Ketika sebuah benda logam memasuki area medan elektromagnetik tersebut, akan terjadi perubahan karakteristik medan yang menyebabkan perubahan sinyal

pada rangkaian sensor. Perubahan ini kemudian diolah menjadi sinyal keluaran yang menunjukkan keberadaan objek pada jarak tertentu. Sensor induktif banyak digunakan untuk mendeteksi benda logam karena memiliki tingkat akurasi yang baik dan tidak dipengaruhi oleh warna maupun kondisi permukaan objek.

Pada umumnya, sensor *proximity* menghasilkan keluaran digital berupa kondisi ON dan OFF. Ketika objek berada dalam jangkauan deteksi, sensor akan mengaktifkan sinyal keluaran. Sebaliknya, ketika objek meninggalkan area deteksi, sinyal akan kembali ke kondisi semula. Beberapa sensor juga dirancang untuk menghasilkan keluaran analog sehingga dapat memberikan informasi mengenai jarak objek secara lebih rinci. Karakteristik ini membuat sensor *proximity* tidak hanya digunakan sebagai alat pendeteksi keberadaan objek, tetapi juga sebagai perangkat pengukuran posisi dan perpindahan dalam berbagai aplikasi industri (Morris & Langari, 2021).

7.3.3 Jenis-Jenis Sensor *Proximity*

Sensor *proximity* terdiri atas beberapa jenis yang dibedakan berdasarkan metode pendeteksiannya. Sensor *proximity* induktif merupakan jenis yang paling banyak digunakan dalam lingkungan industri karena mampu mendeteksi benda logam tanpa kontak langsung. Sensor ini bekerja dengan memanfaatkan perubahan medan elektromagnetik yang terjadi ketika objek logam mendekati permukaan sensor. Berdasarkan modul praktikum sensor industri, sensor induktif banyak digunakan pada sistem kontrol konveyor,

pendeteksian posisi, proses pemesinan, pengukuran jarak, serta berbagai aplikasi otomasi yang melibatkan komponen logam.

Jenis lainnya adalah sensor *proximity* kapasitif yang bekerja berdasarkan perubahan nilai kapasitansi akibat keberadaan objek di sekitar sensor. Berbeda dengan sensor induktif, sensor kapasitif mampu mendeteksi benda logam maupun nonlogam seperti plastik, kayu, kaca, cairan, dan bahan organik lainnya. Kemampuan ini menjadikan sensor kapasitif banyak digunakan pada pengukuran level cairan, pendeteksian material dalam wadah tertutup, dan berbagai aplikasi proses industri.

Selain sensor induktif dan kapasitif, terdapat pula sensor fotoelektrik (*photoelectric sensor*) yang memanfaatkan pancaran cahaya sebagai media pendeteksian. Sensor ini bekerja dengan mengukur perubahan intensitas cahaya yang diterima oleh bagian penerima (*receiver*). Ketika objek menghalangi atau memantulkan cahaya yang dipancarkan oleh bagian pemancar (*transmitter*), sensor akan menghasilkan sinyal keluaran yang menunjukkan keberadaan objek. Sensor fotoelektrik memiliki jangkauan pendeteksian yang relatif lebih jauh dibandingkan sensor induktif maupun kapasitif sehingga sering digunakan pada sistem produksi berskala besar dan jalur konveyor otomatis.

7.3.4 Aplikasi Sensor *Proximity* dalam Industri

Sensor *proximity* memiliki berbagai aplikasi dalam dunia industri karena mampu mendukung proses otomasi yang cepat dan akurat. Pada industri manufaktur, sensor ini digunakan untuk mendeteksi keberadaan benda kerja pada jalur produksi, menghitung

jumlah produk, serta memastikan posisi komponen selama proses perakitan berlangsung. Sensor *proximity* juga digunakan pada sistem konveyor untuk mengatur aliran material secara otomatis sehingga proses produksi dapat berjalan dengan lebih efisien.

Dalam industri otomotif, sensor *proximity* berperan dalam mendeteksi posisi komponen logam selama proses perakitan kendaraan. Pada sistem robot industri, sensor ini digunakan untuk membantu menentukan posisi objek yang akan dipindahkan atau diproses oleh lengan robot. Selain itu, sensor *proximity* juga diterapkan pada sistem keselamatan kerja untuk mendeteksi keberadaan operator di area berbahaya sehingga mesin dapat dihentikan secara otomatis ketika diperlukan. Perkembangan teknologi *Industrial Internet of Things (IIoT)* semakin memperluas penggunaan sensor *proximity* karena sensor ini dapat diintegrasikan dengan sistem pemantauan dan pengendalian berbasis jaringan sehingga memungkinkan proses produksi dipantau secara real-time dan lebih efisien (Patranabis, 2023).

7.4 Encoder

7.4.1 Pengertian dan Fungsi Encoder

Encoder merupakan sensor yang digunakan untuk mendeteksi posisi, arah putaran, kecepatan, maupun perpindahan suatu poros atau objek yang bergerak. Dalam sistem otomasi industri, *encoder* berfungsi mengubah gerakan mekanis menjadi sinyal listrik yang dapat dibaca oleh sistem kontrol seperti

Programmable Logic Controller (PLC), *microcontroller*, maupun sistem kendali lainnya. Sensor ini banyak digunakan pada mesin produksi, konveyor, robot industri, mesin CNC, dan berbagai peralatan otomatis yang membutuhkan informasi posisi dan kecepatan secara akurat.

Prinsip dasar kerja *encoder* adalah menghasilkan sinyal digital berdasarkan perubahan posisi suatu cakram atau poros yang berputar. Informasi yang dihasilkan kemudian digunakan oleh sistem kontrol untuk menentukan jumlah putaran, arah gerakan, atau posisi aktual suatu mekanisme. Oleh karena itu, *encoder* menjadi salah satu komponen penting dalam sistem kendali gerak (*motion control*) yang memerlukan tingkat akurasi dan respons yang tinggi. Menurut modul praktikum sensor industri, *encoder* termasuk sensor posisi yang banyak digunakan dalam aplikasi industri karena mampu menghasilkan sinyal digital yang mudah diintegrasikan dengan perangkat kontrol elektronik modern (Siswoyo, 2026).

7.4.2 Jenis dan Prinsip Kerja Encoder

Secara umum, *encoder* dibedakan menjadi dua jenis utama, yaitu *absolute encoder* dan *incremental encoder*. *Absolute encoder* menghasilkan kode digital unik untuk setiap posisi poros sehingga posisi aktual tetap dapat diketahui meskipun catu daya terputus. Jenis ini banyak digunakan pada aplikasi yang memerlukan informasi posisi absolut dengan tingkat keandalan tinggi.

Sementara itu, *incremental encoder* bekerja dengan menghasilkan pulsa-pulsa digital ketika poros berputar. Jumlah pulsa yang dihasilkan digunakan untuk menentukan perpindahan

atau kecepatan putaran. Pada *incremental encoder*, umumnya terdapat dua kanal keluaran yang dikenal sebagai kanal A dan kanal B. Perbedaan fasa antara kedua sinyal tersebut memungkinkan sistem kontrol menentukan arah putaran, baik searah jarum jam maupun berlawanan arah jarum jam (Siswoyo, 2026).

Prinsip kerja *encoder* optik didasarkan pada interaksi antara sumber cahaya, cakram berpola, dan *photodetector*. Ketika cakram berputar, pola transparan dan tidak transparan pada cakram akan secara bergantian melewati atau menghalangi cahaya menuju sensor. Kondisi tersebut menghasilkan perubahan sinyal listrik berupa logika tinggi (*high*) dan logika rendah (*low*) yang kemudian diproses oleh sistem kontrol. Semakin tinggi resolusi *encoder*, semakin banyak pulsa yang dihasilkan dalam satu putaran sehingga ketelitian pengukuran posisi menjadi lebih baik.

7.4.3 Penerapan Encoder dalam Sistem Industri

Penggunaan *encoder* sangat luas dalam berbagai aplikasi industri yang memerlukan pengukuran posisi dan kecepatan secara presisi. Pada sistem konveyor, *encoder* digunakan untuk memantau kecepatan pergerakan sabuk sehingga sinkronisasi proses produksi dapat dilakukan dengan lebih baik. Pada mesin *CNC* dan robot industri, sensor ini berfungsi memberikan umpan balik (*feedback*) posisi sehingga pergerakan aktuator dapat dikontrol secara akurat sesuai program yang telah ditentukan.

Selain itu, *encoder* juga banyak digunakan pada sistem penggerak motor servo dan motor langkah (*stepper motor*). Dalam aplikasi tersebut, data posisi yang dihasilkan *encoder* digunakan

untuk membandingkan posisi aktual dengan posisi target sehingga sistem kontrol dapat melakukan koreksi apabila terjadi penyimpangan. Kemampuan ini sangat penting untuk menjaga ketelitian proses manufaktur modern yang menuntut tingkat presisi tinggi.

Salah satu contoh penerapan *encoder* yang sederhana dapat ditemukan pada *mouse* mekanik yang menggunakan bola (*trackball*). Pergerakan bola akan memutar cakram *encoder* sehingga menghasilkan pulsa yang diterjemahkan menjadi pergerakan kursor pada layar komputer. Prinsip yang sama kemudian dikembangkan untuk berbagai aplikasi industri yang membutuhkan pengukuran gerak secara real-time. Dengan kemampuannya menghasilkan informasi posisi dan kecepatan secara akurat, *encoder* menjadi salah satu sensor yang sangat penting dalam sistem otomasi dan pengendalian industri modern.

7.5 Sistem Pengukuran

7.5.1 Pengertian Sistem Pengukuran

Sistem pengukuran merupakan suatu sistem yang digunakan untuk memperoleh informasi mengenai besaran fisik atau kimia dari suatu objek, kemudian mengubah informasi tersebut menjadi data yang dapat dibaca, dianalisis, dan dimanfaatkan dalam proses pengendalian. Dalam lingkungan industri, sistem pengukuran memiliki peran yang sangat penting karena menjadi sumber informasi utama bagi sistem otomasi maupun operator dalam

memantau kondisi proses produksi. Sistem pengukuran bekerja melalui serangkaian komponen yang saling terhubung sehingga mampu menghasilkan data yang akurat dan dapat diandalkan. Menurut Siswoyo (2026), sensor merupakan komponen yang berfungsi mendeteksi perubahan lingkungan fisik atau kimia dan mengubahnya menjadi besaran listrik yang dapat diproses oleh rangkaian elektronik. Dengan demikian, sistem pengukuran menjadi dasar dalam pelaksanaan pengawasan, pengendalian, dan evaluasi proses industri secara berkelanjutan.

7.5.2 Komponen Sistem Pengukuran

Sistem pengukuran terdiri atas beberapa komponen utama yang bekerja secara terpadu untuk menghasilkan informasi pengukuran. Komponen pertama adalah sensor yang berfungsi sebagai elemen pendeteksi terhadap besaran yang akan diukur, seperti suhu, tekanan, jarak, posisi, kecepatan, maupun aliran. Setelah sensor mendeteksi perubahan pada objek pengukuran, sinyal yang dihasilkan akan diteruskan ke transduser atau rangkaian pengkondisi sinyal untuk diperkuat, difilter, atau dikonversi sesuai kebutuhan sistem. Selanjutnya, data hasil pengukuran akan diproses oleh perangkat pengendali seperti *Programmable Logic Controller* (PLC), mikrokontroler, atau komputer industri sebelum ditampilkan melalui perangkat keluaran. Siswoyo (2026) menjelaskan bahwa sensor dapat menghasilkan sinyal analog maupun digital tergantung pada karakteristik dan kebutuhan aplikasinya. Integrasi seluruh komponen tersebut memungkinkan proses pengukuran dilakukan secara cepat, akurat, dan berkesinambungan.

7.5.3 Karakteristik Sistem Pengukuran

Kualitas suatu sistem pengukuran ditentukan oleh sejumlah karakteristik yang menjadi parameter kinerjanya. Salah satu karakteristik yang paling penting adalah akurasi (*accuracy*), yaitu tingkat kedekatan antara hasil pengukuran dengan nilai sebenarnya. Selain itu, terdapat pula presisi (*precision*) yang menunjukkan kemampuan sistem dalam menghasilkan data yang konsisten ketika pengukuran dilakukan berulang kali pada kondisi yang sama. Karakteristik lain yang tidak kalah penting adalah resolusi (*resolution*), sensitivitas (*sensitivity*), linearitas (*linearity*), waktu tanggap (*response time*), rentang ukur (*range*), dan kemampuan pengulangan (*repeatability*). Menurut Siswoyo (2026), karakteristik tersebut digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi kualitas sensor dan sistem pengukuran yang digunakan dalam aplikasi industri. Semakin baik karakteristik yang dimiliki suatu sistem pengukuran, semakin tinggi pula tingkat keandalan data yang dihasilkan untuk mendukung proses pengambilan keputusan.

7.5.4 Penerapan Sistem Pengukuran dalam Industri

Penerapan sistem pengukuran dapat ditemukan pada hampir seluruh sektor industri modern. Dalam industri manufaktur, sistem pengukuran digunakan untuk mendeteksi posisi benda kerja, memantau kecepatan putaran mesin, mengukur dimensi produk, serta mengendalikan kualitas hasil produksi. Berbagai jenis sensor seperti sensor induktif, sensor kapasitif, sensor fotoelektrik, sensor suhu, dan *rotary encoder* digunakan sesuai karakteristik objek yang akan diukur. Pada industri proses, sistem pengukuran berperan

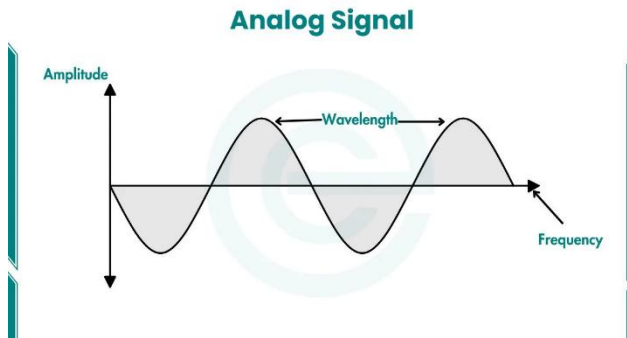
dalam pemantauan parameter penting seperti temperatur, tekanan, level cairan, dan laju aliran fluida. Data hasil pengukuran tersebut kemudian digunakan sebagai masukan bagi sistem kendali otomatis untuk menjaga proses tetap berada pada kondisi operasi yang diinginkan. Seiring perkembangan teknologi industri, sistem pengukuran juga semakin terintegrasi dengan jaringan komunikasi digital sehingga memungkinkan proses pemantauan dilakukan secara *real-time*. Kondisi ini mendukung peningkatan efisiensi operasional, kualitas produk, serta keselamatan kerja dalam lingkungan industri modern (Siswoyo, 2026).

Bab 8: Sinyal Analog dan Digital

Ir. Eko Aris Budi Cahyono, M.Eng.

8.1 Analog Signal

8.1.1 Pengertian *Analog Signal*



Gambar 8.1. Analog signal

Sumber: <https://share.google/GudppieZYxZq7iYA4>

Analog signal merupakan sinyal yang nilainya berubah secara kontinu terhadap waktu dan dapat merepresentasikan berbagai kondisi fisik yang terjadi pada suatu sistem. Dalam bidang instrumentasi dan otomasi industri, sinyal analog digunakan untuk menyampaikan informasi mengenai variabel proses seperti suhu, tekanan, level cairan, laju aliran, dan kelembapan. Karakteristik kontinu yang dimiliki sinyal analog memungkinkan perubahan

kondisi proses direpresentasikan secara langsung tanpa adanya pemutusan nilai menjadi interval tertentu (Bolton, 2021).

Pada sistem pengukuran industri, sensor umumnya menghasilkan sinyal analog sebagai keluaran awal. Ketika suatu variabel proses mengalami perubahan, sensor akan mengubah perubahan tersebut menjadi sinyal listrik berupa tegangan atau arus yang nilainya sebanding dengan besaran yang diukur. Informasi tersebut kemudian dikirim ke sistem kontrol untuk diproses lebih lanjut sehingga kondisi operasi dapat dipantau dan dikendalikan secara efektif.

Penggunaan sinyal analog telah menjadi bagian penting dalam perkembangan sistem instrumentasi karena mampu memberikan informasi yang rinci mengenai kondisi aktual suatu proses. Oleh karena itu, pemahaman mengenai konsep sinyal analog sangat diperlukan dalam perancangan dan pengoperasian sistem kontrol industri.

8.1.2 Karakteristik *Analog Signal*

Karakteristik utama *analog signal* adalah kemampuannya menghasilkan perubahan nilai secara berkelanjutan. Berbeda dengan sinyal digital yang hanya memiliki sejumlah nilai tertentu, sinyal analog dapat memiliki jumlah nilai yang sangat banyak dalam suatu rentang pengukuran. Kondisi ini memungkinkan representasi variabel proses dilakukan dengan tingkat detail yang tinggi (Morris, 2021).

Sinyal analog memiliki beberapa parameter penting yang digunakan dalam analisis sistem instrumentasi, yaitu amplitudo,

frekuensi, dan fase. Amplitudo menunjukkan besar sinyal yang dihasilkan, frekuensi menggambarkan jumlah siklus yang terjadi dalam satu satuan waktu, sedangkan fase menunjukkan posisi suatu gelombang terhadap titik referensi tertentu. Ketiga parameter tersebut berperan penting dalam proses pengolahan dan interpretasi data hasil pengukuran.

Selain itu, sinyal analog memiliki hubungan yang bersifat proporsional terhadap variabel yang diukur. Sebagai contoh, peningkatan suhu pada suatu proses dapat menghasilkan peningkatan tegangan keluaran sensor secara bertahap. Hubungan proporsional ini memudahkan sistem kontrol dalam melakukan pemantauan dan pengendalian proses secara akurat.

Meskipun memiliki kemampuan representasi yang baik, sinyal analog relatif rentan terhadap gangguan atau *noise*. Gangguan tersebut dapat berasal dari medan elektromagnetik, peralatan listrik di sekitar sistem, maupun kondisi lingkungan tertentu yang memengaruhi kualitas sinyal. Oleh karena itu, diperlukan teknik pengkondisian sinyal agar informasi yang dikirimkan tetap akurat dan dapat diandalkan.

8.1.3 Bentuk Sinyal Analog dalam Industri

Dalam aplikasi industri, sinyal analog umumnya ditransmisikan dalam bentuk tegangan maupun arus listrik. Sinyal tegangan yang sering digunakan antara lain 0–5 volt, 0–10 volt, dan ± 10 volt. Bentuk sinyal ini banyak diterapkan pada sistem kontrol yang memiliki jarak transmisi relatif pendek karena mudah diintegrasikan dengan berbagai perangkat instrumentasi.

Selain sinyal tegangan, sistem industri modern juga banyak menggunakan standar arus 4–20 mA. Standar ini dipilih karena memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap gangguan selama proses transmisi. Pada sistem 4–20 mA, nilai 4 mA mewakili kondisi minimum pengukuran, sedangkan nilai 20 mA menunjukkan kondisi maksimum pengukuran (Lipták, 2022).

Penggunaan standar arus memberikan keuntungan dalam proses pemantauan kondisi sistem. Apabila terjadi kerusakan kabel atau kegagalan sensor, arus akan turun di bawah nilai normal sehingga gangguan dapat segera dideteksi. Oleh karena itu, standar 4–20 mA menjadi salah satu metode transmisi sinyal analog yang paling banyak digunakan dalam industri proses.

8.1.4 Penerapan *Analog Signal* pada Sistem Instrumentasi

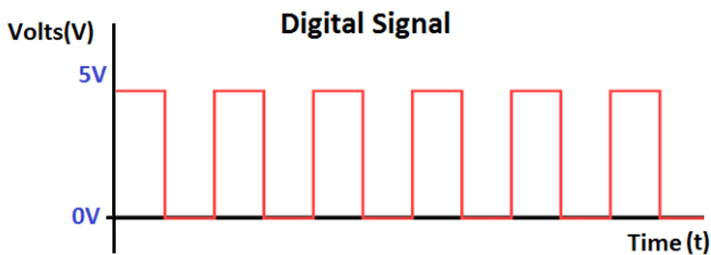
Sinyal analog digunakan pada hampir seluruh sistem pengukuran dan pengendalian industri. Sensor suhu seperti RTD dan thermocouple menghasilkan sinyal analog yang berubah sesuai temperatur proses. Sensor tekanan, sensor level, dan sensor aliran juga bekerja dengan prinsip yang sama, yaitu mengubah besaran fisik menjadi sinyal listrik yang dapat diproses oleh sistem kontrol (Bolton, 2021).

Dalam sistem otomasi, sinyal analog diterima oleh perangkat seperti *Programmable Logic Controller* (PLC), *Distributed Control System* (DCS), atau sistem akuisisi data. Perangkat tersebut kemudian mengolah informasi yang diterima untuk menentukan tindakan pengendalian yang diperlukan agar variabel proses tetap berada pada kondisi yang diinginkan.

Penerapan sinyal analog dapat ditemukan pada berbagai sektor industri, seperti pembangkit tenaga listrik, industri kimia, manufaktur, pengolahan air, serta industri minyak dan gas. Kemampuan sinyal analog dalam menggambarkan perubahan kondisi proses secara kontinu menjadikannya salah satu elemen penting dalam sistem instrumentasi modern yang menuntut ketelitian dan keandalan tinggi.

8.2 Digital Signal

8.2.1 Pengertian *Digital Signal*



Gambar 8.2. Digital Signal

Sumber: <https://share.google/etcFiXj4BAoCFBW9x>

Digital signal merupakan sinyal yang direpresentasikan dalam bentuk nilai-nilai diskrit yang umumnya dinyatakan menggunakan sistem bilangan biner, yaitu angka 0 dan 1. Berbeda dengan sinyal analog yang memiliki perubahan kontinu terhadap waktu, sinyal digital hanya memiliki tingkat nilai tertentu sehingga lebih mudah diproses oleh perangkat elektronik modern. Dalam sistem instrumentasi dan otomasi industri, sinyal digital digunakan untuk mengirimkan informasi, mengendalikan peralatan, serta

mendukung proses komunikasi data antarperangkat secara cepat dan akurat (Bolton, 2021).

Perkembangan teknologi komputer dan sistem kendali berbasis mikroprosesor telah meningkatkan penggunaan sinyal digital dalam berbagai bidang industri. Kemampuan sinyal digital untuk mempertahankan kualitas data selama proses transmisi menjadikannya lebih andal dibandingkan sinyal analog pada lingkungan yang memiliki gangguan elektromagnetik tinggi. Oleh karena itu, sinyal digital menjadi dasar bagi berbagai sistem otomasi modern yang membutuhkan kecepatan dan ketepatan dalam pengolahan informasi.

8.2.2 Karakteristik *Digital Signal*

Salah satu karakteristik utama sinyal digital adalah kemampuannya merepresentasikan informasi dalam bentuk logika biner. Setiap data diubah menjadi kombinasi angka 0 dan 1 yang kemudian diproses oleh sistem elektronik. Karakteristik ini memungkinkan proses penyimpanan, pengolahan, dan pengiriman data dilakukan secara lebih efisien dibandingkan sistem analog.

Selain itu, sinyal digital memiliki ketahanan yang tinggi terhadap gangguan (*noise*). Ketika terjadi interferensi selama proses transmisi, sinyal digital masih dapat dikenali dan direkonstruksi sehingga informasi yang diterima tetap sesuai dengan data aslinya. Kemampuan ini menjadi salah satu alasan utama mengapa teknologi digital banyak digunakan pada sistem komunikasi dan pengendalian industri.

Karakteristik lainnya adalah kemudahan integrasi dengan perangkat berbasis komputer. Karena data disimpan dalam bentuk digital, informasi dapat diproses menggunakan berbagai algoritma untuk mendukung sistem pemantauan, analisis, dan pengambilan keputusan secara otomatis.

8.2.3 Proses Pembentukan *Digital Signal*

Pada banyak aplikasi industri, informasi yang berasal dari lingkungan sekitar umumnya masih berbentuk sinyal analog. Agar dapat diproses oleh sistem digital, sinyal tersebut harus dikonversi terlebih dahulu menggunakan perangkat *Analog to Digital Converter* (ADC). Proses konversi dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu *sampling*, kuantisasi (*quantization*), dan pengkodean (*encoding*).

Tahap *sampling* dilakukan dengan mengambil nilai sinyal analog pada interval waktu tertentu. Selanjutnya, hasil pengambilan sampel tersebut dikonversi ke dalam tingkat nilai diskrit melalui proses kuantisasi. Setelah itu, setiap nilai diubah menjadi kode biner sehingga dapat diproses oleh komputer, PLC, maupun mikrokontroler (Tompkins & Webster, 2022).

Kualitas sinyal digital yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh frekuensi *sampling* dan resolusi ADC. Semakin tinggi frekuensi *sampling* dan jumlah bit yang digunakan, semakin baik representasi digital terhadap sinyal analog yang diukur.

8.2.4 Aplikasi *Digital Signal* dalam Industri

Penggunaan sinyal digital dapat ditemukan pada hampir seluruh sistem otomasi industri modern. Pada sistem kendali

berbasis PLC, sinyal digital digunakan untuk menerima informasi dari sensor dan memberikan perintah kepada aktuator seperti motor, kontaktor, katup solenoid, dan sistem penggerak lainnya. Sensor digital seperti *proximity sensor*, *limit switch*, dan sensor fotoelektrik menghasilkan sinyal ON atau OFF yang dapat langsung diproses oleh sistem kendali.

Selain itu, sinyal digital juga digunakan pada jaringan komunikasi industri seperti Modbus, Profibus, dan Ethernet Industrial. Teknologi tersebut memungkinkan pertukaran data secara cepat antara berbagai perangkat dalam sistem produksi. Dalam bidang instrumentasi, sinyal digital dimanfaatkan untuk proses pencatatan data (*data logging*), pemantauan jarak jauh (*remote monitoring*), dan sistem kendali otomatis yang terintegrasi dengan komputer industri (Bolton, 2021).

Penerapan konsep *Internet of Things* (IoT) dalam industri juga semakin meningkatkan penggunaan sinyal digital karena seluruh komunikasi data dilakukan dalam format digital yang dapat dikirimkan melalui jaringan lokal maupun internet.

8.2.5 Keunggulan dan Keterbatasan Digital Signal

Sinyal digital memiliki berbagai keunggulan yang menjadikannya pilihan utama dalam sistem elektronik modern. Keunggulan tersebut meliputi ketahanan terhadap gangguan, kemudahan penyimpanan data, kemampuan integrasi dengan komputer, serta kemudahan dalam proses pengolahan dan analisis informasi. Selain itu, sinyal digital memungkinkan penerapan teknologi otomatisasi yang lebih kompleks dan fleksibel.

Meskipun demikian, penggunaan sinyal digital juga memiliki beberapa keterbatasan. Proses konversi dari sinyal analog ke digital memerlukan perangkat tambahan seperti ADC yang dapat meningkatkan kompleksitas sistem. Selain itu, kualitas representasi sinyal sangat bergantung pada resolusi dan frekuensi *sampling* yang digunakan. Apabila parameter tersebut terlalu rendah, sebagian informasi dari sinyal asli dapat hilang sehingga akurasi data menjadi berkurang (Tompkins & Webster, 2022).

8.3 4–20 mA

8.3.1 Pengertian Sinyal 4–20 mA

Sinyal 4–20 mA merupakan standar sinyal analog yang paling banyak digunakan dalam sistem instrumentasi dan otomasi industri. Standar ini digunakan untuk mentransmisikan informasi pengukuran dari sensor atau transduser menuju perangkat pengendali seperti *Programmable Logic Controller* (PLC), *Distributed Control System* (DCS), maupun sistem pemantauan lainnya. Pada sistem ini, nilai arus listrik sebesar 4 mA merepresentasikan nilai minimum pengukuran, sedangkan 20 mA merepresentasikan nilai maksimum pengukuran. Dengan demikian, perubahan nilai variabel proses akan ditunjukkan melalui perubahan arus secara proporsional dalam rentang tersebut.

Penggunaan arus sebagai media transmisi sinyal memiliki beberapa keunggulan dibandingkan penggunaan tegangan. Sinyal arus relatif lebih tahan terhadap gangguan listrik, penurunan

tegangan pada kabel, serta perubahan resistansi penghantar akibat panjang kabel yang besar. Oleh karena itu, standar 4–20 mA banyak diterapkan pada industri proses seperti pembangkit listrik, industri minyak dan gas, manufaktur, pengolahan air, dan industri kimia yang memerlukan pengiriman sinyal pada jarak yang cukup jauh (Morris & Langari, 2021).

Selain berfungsi sebagai media transmisi data, rentang 4–20 mA juga memungkinkan deteksi kondisi gangguan pada sistem. Nilai arus di bawah 4 mA atau di atas 20 mA dapat digunakan sebagai indikasi adanya kerusakan sensor, putusnya kabel, atau gangguan pada perangkat instrumentasi sehingga proses pemeliharaan dapat dilakukan lebih cepat dan efektif.

8.3.2 Prinsip Kerja Sinyal 4–20 mA

Prinsip kerja sinyal 4–20 mA didasarkan pada hubungan linier antara nilai variabel proses dan besar arus yang ditransmisikan. Ketika sensor mendeteksi suatu besaran fisik, seperti suhu, tekanan, level, atau aliran, sensor akan mengubah hasil pengukuran tersebut menjadi sinyal arus dalam rentang 4–20 mA. Semakin besar nilai variabel yang diukur, semakin besar pula arus yang dikirimkan menuju sistem pengendali.

Sebagai contoh, apabila sebuah sensor tekanan memiliki rentang pengukuran 0–100 psi, maka tekanan 0 psi akan menghasilkan arus sebesar 4 mA, sedangkan tekanan 100 psi akan menghasilkan arus sebesar 20 mA. Nilai tekanan di antara kedua batas tersebut akan menghasilkan arus yang berubah secara proporsional sesuai dengan hasil pengukuran. Hubungan linier ini

memudahkan proses konversi sinyal menjadi data digital yang dapat diproses oleh PLC atau sistem kontrol lainnya (Doebelin & Manik, 2019).

Keberadaan arus minimum sebesar 4 mA dikenal sebagai *live zero*. Konsep ini memungkinkan sistem membedakan antara kondisi pengukuran minimum dan kondisi gangguan seperti kabel terputus. Jika arus turun hingga 0 mA, sistem dapat mengidentifikasi bahwa telah terjadi kegagalan transmisi sinyal sehingga tindakan korektif dapat segera dilakukan.

8.3.3 Keunggulan Penggunaan Sinyal 4–20 mA

Sinyal 4–20 mA memiliki berbagai keunggulan yang menjadikannya standar utama dalam dunia instrumentasi industri. Salah satu keunggulan utamanya adalah ketahanan terhadap gangguan elektromagnetik (*electromagnetic interference*). Karena informasi dikirim dalam bentuk arus, perubahan resistansi kabel tidak akan memengaruhi akurasi sinyal secara signifikan selama arus tetap mengalir sesuai nilai yang ditentukan.

Keunggulan lainnya adalah kemampuan transmisi pada jarak yang relatif jauh tanpa mengalami penurunan kualitas sinyal yang berarti. Dalam instalasi industri yang luas, sensor sering ditempatkan jauh dari ruang kontrol. Penggunaan sinyal 4–20 mA memungkinkan data tetap dikirim secara akurat meskipun melalui kabel dengan panjang ratusan meter.

Selain itu, sistem 4–20 mA memiliki struktur yang sederhana dan kompatibel dengan berbagai perangkat industri. Banyak sensor, *transmitter*, PLC, DCS, dan perangkat kontrol modern dirancang

untuk mendukung standar ini sehingga integrasi antarperalatan menjadi lebih mudah. Faktor-faktor tersebut menjadikan sinyal 4–20 mA tetap digunakan secara luas meskipun teknologi komunikasi digital industri terus berkembang (Bentley, 2023).

8.3.4 Penerapan Sinyal 4–20 mA dalam Industri

Penerapan sinyal 4–20 mA dapat ditemukan pada hampir seluruh sistem pengukuran dan pengendalian proses industri. Pada sistem pengukuran suhu, *temperature transmitter* akan mengubah hasil pembacaan sensor RTD atau *thermocouple* menjadi sinyal 4–20 mA yang kemudian dikirim ke PLC atau DCS. Proses serupa juga diterapkan pada pengukuran tekanan, level cairan, laju aliran, dan berbagai parameter proses lainnya.

Dalam industri minyak dan gas, sinyal 4–20 mA digunakan untuk memantau tekanan pipa, level tangki penyimpanan, dan temperatur proses secara berkelanjutan. Pada industri pengolahan air, sinyal ini digunakan untuk mengirim data level reservoir, debit aliran, dan kualitas air ke pusat kendali. Sementara itu, pada sektor manufaktur, sinyal 4–20 mA berperan dalam pengendalian mesin produksi dan sistem otomasi yang membutuhkan data pengukuran secara real-time.

Perkembangan teknologi industri modern juga memungkinkan sinyal 4–20 mA dikombinasikan dengan protokol komunikasi digital seperti HART (*Highway Addressable Remote Transducer*). Integrasi tersebut memungkinkan pengiriman data pengukuran sekaligus informasi diagnostik melalui jalur yang sama sehingga meningkatkan efisiensi pemantauan dan pemeliharaan

sistem instrumentasi. Dengan tingkat keandalan yang tinggi, kemudahan integrasi, serta kemampuan bekerja pada berbagai kondisi lingkungan, sinyal 4–20 mA tetap menjadi standar penting dalam sistem otomasi dan instrumentasi industri hingga saat ini.

8.4 0–10 Volt

8.4.1 Pengertian Sinyal 0–10 Volt

Sinyal 0–10 Volt merupakan salah satu standar sinyal analog yang banyak digunakan dalam sistem instrumentasi dan otomasi industri. Sinyal ini digunakan untuk merepresentasikan perubahan suatu besaran fisik, seperti suhu, tekanan, level, kecepatan, atau posisi, ke dalam bentuk tegangan listrik yang berada pada rentang 0 hingga 10 Volt. Nilai tegangan yang dihasilkan berbanding lurus dengan nilai variabel yang diukur sehingga memudahkan proses pengolahan data oleh perangkat kontrol maupun sistem pemantauan.

Pada sistem pengukuran analog, perubahan nilai proses akan menghasilkan perubahan tegangan secara kontinu. Sebagai contoh, apabila sebuah sensor level memiliki rentang pengukuran 0–100%, maka tegangan keluaran 0 Volt dapat mewakili level 0%, sedangkan tegangan 10 Volt mewakili level 100%. Nilai di antara kedua batas tersebut akan menunjukkan kondisi level secara proporsional. Karakteristik inilah yang menjadikan sinyal 0–10 Volt banyak digunakan dalam sistem pengendalian proses industri yang memerlukan informasi variabel secara kontinu.

Penggunaan sinyal tegangan analog memberikan kemudahan dalam integrasi dengan berbagai perangkat seperti *Programmable Logic Controller* (PLC), *Human Machine Interface* (HMI), pengendali suhu, dan sistem akuisisi data. Selain itu, prinsip pengukuran menggunakan sinyal analog juga menjadi dasar dalam berbagai aplikasi sensor industri modern (Siswoyo, 2026).

8.4.2 Prinsip Kerja Sinyal 0–10 Volt

Prinsip kerja sinyal 0–10 Volt didasarkan pada hubungan linier antara nilai variabel proses dan tegangan keluaran sensor atau transduser. Ketika nilai variabel yang diukur meningkat, tegangan keluaran juga meningkat secara proporsional. Sebaliknya, apabila nilai variabel menurun, tegangan keluaran akan berkurang sesuai dengan perubahan yang terjadi.

Sebagai ilustrasi, sebuah sensor tekanan dengan rentang pengukuran 0–50 bar dan keluaran 0–10 Volt akan menghasilkan tegangan 5 Volt ketika tekanan yang terukur mencapai 25 bar. Dengan demikian, sistem kontrol dapat menentukan nilai tekanan aktual berdasarkan besarnya tegangan yang diterima. Hubungan linier tersebut memungkinkan proses konversi sinyal menjadi lebih sederhana dan mudah diproses oleh perangkat elektronik.

Dalam sistem otomasi, sinyal 0–10 Volt biasanya diterima oleh modul masukan analog (*analog input module*) yang terdapat pada PLC atau sistem kontrol lainnya. Modul tersebut akan mengubah sinyal tegangan menjadi data digital melalui proses *Analog to Digital Conversion* (ADC). Data digital yang dihasilkan kemudian digunakan untuk proses pemantauan, pengendalian,

maupun pengambilan keputusan secara otomatis dalam sistem industri.

8.4.3 Penerapan Sinyal 0–10 Volt pada Sistem Industri

Sinyal 0–10 Volt banyak digunakan pada berbagai aplikasi instrumentasi dan otomasi industri. Salah satu penerapan yang umum adalah pada sensor suhu, sensor tekanan, sensor level, serta sensor posisi yang menghasilkan keluaran analog. Sinyal tersebut kemudian dikirim ke sistem kontrol untuk digunakan sebagai dasar pengendalian proses produksi.

Selain digunakan sebagai sinyal keluaran sensor, standar 0–10 Volt juga banyak dimanfaatkan sebagai sinyal kendali (*control signal*). Misalnya, pada pengaturan kecepatan *Variable Frequency Drive* (VFD), tegangan 0 Volt dapat mewakili kondisi motor berhenti, sedangkan tegangan 10 Volt menunjukkan kecepatan maksimum yang diizinkan. Dengan cara ini, kecepatan motor dapat diatur secara proporsional sesuai kebutuhan proses.

Pada sistem pengendalian suhu menggunakan pengendali elektronik, sinyal 0–10 Volt sering digunakan untuk mengatur posisi katup kontrol, daya pemanas, maupun kecepatan kipas pendingin. Kemampuan sinyal analog dalam merepresentasikan perubahan nilai secara kontinu membuat sistem kontrol mampu menghasilkan respons yang lebih halus dibandingkan sinyal digital yang hanya memiliki kondisi hidup (*on*) dan mati (*off*). Oleh karena itu, sinyal 0–10 Volt tetap menjadi salah satu standar komunikasi analog yang

banyak digunakan dalam berbagai sistem instrumentasi industri hingga saat ini.

8.5 Digital I/O

8.5.1 Pengertian *Digital I/O*

Digital Input/Output (Digital I/O) merupakan sistem antarmuka yang digunakan untuk menerima dan mengirimkan sinyal digital antara perangkat kontrol dan perangkat lapangan dalam suatu sistem otomasi industri. Sinyal digital hanya memiliki dua kondisi logika, yaitu logika 0 (*OFF*) dan logika 1 (*ON*). Karakteristik ini membedakan sinyal digital dari sinyal analog yang memiliki nilai kontinu dalam rentang tertentu. Dalam sistem industri modern, *Digital I/O* digunakan untuk menghubungkan sensor, sakelar, aktuator, indikator, serta berbagai perangkat kontrol lainnya dengan pengendali seperti *Programmable Logic Controller (PLC)* atau mikrokontroler.

Fungsi utama *Digital I/O* adalah menyediakan media komunikasi sederhana antara perangkat masukan dan keluaran. Melalui sistem ini, kondisi suatu peralatan dapat dipantau dan dikendalikan secara otomatis berdasarkan logika yang telah diprogram sebelumnya. Menurut Bolton (2021), sinyal digital menjadi dasar utama dalam sistem kendali otomatis karena memungkinkan proses pengambilan keputusan dilakukan secara cepat, sederhana, dan andal. Oleh karena itu, *Digital I/O* merupakan

salah satu komponen penting dalam implementasi sistem otomasi industri.

8.5.2 Digital Input

Digital Input adalah bagian dari sistem *Digital I/O* yang berfungsi menerima sinyal digital dari perangkat lapangan menuju sistem kontrol. Perangkat yang umumnya digunakan sebagai sumber *input* digital antara lain tombol tekan (*push button*), sakelar batas (*limit switch*), sensor induktif, sensor kapasitif, sensor fotoelektrik, dan berbagai jenis sensor yang menghasilkan keluaran berupa sinyal logika *ON/OFF*. Ketika perangkat tersebut mendeteksi suatu kondisi tertentu, sinyal akan dikirimkan ke pengendali untuk diproses sesuai program yang telah ditentukan.

Pada sistem PLC, *Digital Input* digunakan untuk membaca status suatu perangkat atau kondisi proses. Sebagai contoh, ketika sebuah tombol ditekan, PLC akan menerima sinyal logika tinggi yang kemudian digunakan untuk menjalankan fungsi tertentu, seperti menghidupkan motor atau mengaktifkan alarm. Keandalan *Digital Input* sangat penting karena kesalahan pembacaan sinyal dapat memengaruhi keseluruhan operasi sistem otomatis. Oleh karena itu, pemilihan sensor dan metode pemasangan harus dilakukan secara tepat agar kualitas sinyal tetap terjaga selama proses operasi.

8.5.3 Digital Output

Digital Output merupakan bagian dari sistem *Digital I/O* yang berfungsi mengirimkan sinyal digital dari pengendali menuju perangkat keluaran. Sinyal ini digunakan untuk mengendalikan berbagai aktuator dan peralatan lapangan yang bekerja berdasarkan kondisi *ON/OFF*. Beberapa contoh perangkat yang dikendalikan melalui *Digital Output* adalah lampu indikator, kontaktor motor, solenoid valve, relai, buzzer, dan perangkat aktuator lainnya.

Ketika sistem kontrol mengirimkan sinyal logika tinggi, perangkat keluaran akan aktif dan menjalankan fungsi yang telah ditentukan. Sebaliknya, ketika sinyal logika rendah dikirimkan, perangkat akan berhenti beroperasi. Menurut Petruzella (2023), penggunaan *Digital Output* memungkinkan proses pengendalian dilakukan secara otomatis dan konsisten sehingga meningkatkan efisiensi operasional dalam sistem industri. Selain itu, *Digital Output* juga memudahkan integrasi berbagai perangkat lapangan ke dalam sistem kontrol yang lebih kompleks.

8.5.4 Penerapan *Digital I/O* dalam Sistem Industri

Penerapan *Digital I/O* dapat ditemukan pada hampir seluruh sistem otomasi industri. Dalam proses manufaktur, *Digital Input* digunakan untuk mendeteksi keberadaan produk pada jalur produksi, memantau posisi mesin, serta membaca status berbagai peralatan proses. Sementara itu, *Digital Output* digunakan untuk mengendalikan motor, aktuator pneumatik, katup otomatis, dan perangkat indikasi yang mendukung kelancaran proses produksi.

Pada sistem pengemasan otomatis, sensor fotoelektrik dapat berfungsi sebagai *Digital Input* untuk mendeteksi keberadaan

produk pada konveyor. Informasi tersebut kemudian diproses oleh PLC yang akan mengirimkan sinyal *Digital Output* untuk mengaktifkan aktuator atau mekanisme pengemasan. Selain itu, *Digital I/O* juga banyak digunakan pada sistem pengolahan makanan, industri kimia, pembangkit listrik, serta sistem utilitas bangunan modern. Perkembangan teknologi industri berbasis *Industrial Internet of Things (IIoT)* semakin meningkatkan peran *Digital I/O* sebagai sarana komunikasi antara perangkat lapangan dan sistem kontrol yang terintegrasi. Dengan demikian, *Digital I/O* menjadi fondasi utama dalam implementasi otomasi industri yang efisien, andal, dan berkelanjutan (Bolton, 2021).

Bab 9: Dasar-Dasar Kalibrasi

Instrumentasi

Ir. Antonius Hendro Noviyanto, M.T.

9.1 Konsep Kalibrasi

9.1.1 Pengertian Kalibrasi

Kalibrasi merupakan suatu proses yang dilakukan untuk menentukan hubungan antara nilai yang ditunjukkan oleh suatu instrumen ukur dengan nilai acuan yang diketahui tingkat ketelitiannya. Dalam bidang instrumentasi industri, kalibrasi bertujuan memastikan bahwa hasil pengukuran yang diberikan oleh instrumen berada dalam batas toleransi yang dapat diterima sehingga data yang diperoleh dapat dipercaya dan digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan operasional (Morris, 2021).



Gambar 9.1. Kalibrasi

Sumber: <https://share.google/mQZaVbyJR9RuSHpo5>

Setiap instrumen ukur berpotensi mengalami penyimpangan akibat faktor usia pemakaian, kondisi lingkungan, getaran, perubahan temperatur, maupun keausan komponen internal. Penyimpangan tersebut dapat menyebabkan hasil pengukuran tidak lagi sesuai dengan nilai sebenarnya. Oleh karena itu, kalibrasi dilakukan secara berkala untuk mengidentifikasi besarnya kesalahan pengukuran (*measurement error*) serta memastikan bahwa instrumen masih mampu bekerja sesuai spesifikasi yang ditetapkan.

Dalam praktik industri, kalibrasi tidak selalu bertujuan untuk memperbaiki instrumen. Proses ini juga digunakan untuk mengevaluasi tingkat akurasi alat ukur dan mendokumentasikan kondisi kinerjanya. Hasil kalibrasi biasanya dinyatakan dalam bentuk sertifikat yang memuat data pengukuran, nilai penyimpangan, ketidakpastian pengukuran, serta informasi mengenai standar acuan yang digunakan selama proses kalibrasi.

9.1.2 Tujuan dan Fungsi Kalibrasi

Kalibrasi memiliki peran penting dalam menjaga kualitas sistem pengukuran dan pengendalian proses industri. Salah satu tujuan utama kalibrasi adalah memastikan bahwa instrumen menghasilkan data yang akurat dan konsisten. Ketepatan hasil pengukuran sangat penting karena berbagai keputusan operasional, pengendalian proses, dan evaluasi kualitas produk bergantung pada informasi yang diperoleh dari instrumen tersebut.

Selain meningkatkan akurasi pengukuran, kalibrasi juga berfungsi untuk mendeteksi adanya penyimpangan atau kerusakan pada instrumen sebelum menimbulkan dampak yang lebih besar

terhadap proses produksi. Melalui kalibrasi berkala, perusahaan dapat mengetahui apakah suatu instrumen masih layak digunakan atau memerlukan perbaikan maupun penggantian.

Fungsi lain dari kalibrasi adalah mendukung penerapan sistem manajemen mutu. Berbagai standar internasional, seperti ISO 9001 dan ISO/IEC 17025, mensyaratkan bahwa peralatan ukur yang digunakan dalam kegiatan pengujian dan produksi harus dikalibrasi secara berkala. Dengan demikian, hasil pengukuran dapat ditelusurkan (*traceable*) ke standar nasional maupun internasional sehingga memiliki tingkat kepercayaan yang tinggi.

Kalibrasi juga berkontribusi dalam meningkatkan keselamatan kerja. Pada sistem industri yang melibatkan tekanan tinggi, temperatur ekstrem, atau bahan berbahaya, kesalahan pengukuran dapat menyebabkan gangguan operasi bahkan kecelakaan. Oleh karena itu, kalibrasi menjadi salah satu langkah penting dalam menjaga keamanan dan keandalan sistem industri.

9.1.3 Prinsip Dasar Kalibrasi

Prinsip dasar kalibrasi adalah membandingkan hasil pengukuran instrumen yang diuji dengan standar acuan yang memiliki tingkat ketelitian lebih tinggi. Standar acuan tersebut harus memiliki keterlacakan (*traceability*) terhadap standar nasional atau internasional sehingga hasil kalibrasi dapat dipertanggungjawabkan secara teknis (Doebelin & Manik, 2019).

Proses kalibrasi dilakukan dengan memberikan sejumlah nilai masukan yang telah diketahui kepada instrumen, kemudian mencatat nilai keluaran yang ditunjukkan oleh alat tersebut. Selisih

antara nilai acuan dan nilai yang ditunjukkan instrumen disebut sebagai kesalahan pengukuran. Apabila kesalahan yang ditemukan masih berada dalam batas toleransi yang ditentukan, maka instrumen dinyatakan layak digunakan. Sebaliknya, apabila penyimpangan melebihi batas yang diperbolehkan, diperlukan tindakan penyesuaian atau perbaikan.

Dalam pelaksanaannya, kalibrasi harus memperhatikan berbagai faktor yang dapat memengaruhi hasil pengukuran, seperti kondisi lingkungan, suhu ruangan, kelembapan, stabilitas sumber daya, serta kompetensi personel yang melakukan pengujian. Pengendalian terhadap faktor-faktor tersebut diperlukan agar hasil kalibrasi memiliki tingkat akurasi dan ketidakpastian yang dapat diterima.

9.1.4 Pentingnya Kalibrasi dalam Instrumentasi Industri

Dalam sistem instrumentasi industri, kalibrasi menjadi bagian yang tidak terpisahkan dari kegiatan pemeliharaan dan pengendalian mutu. Instrumen yang tidak dikalibrasi secara berkala berpotensi menghasilkan data yang tidak akurat sehingga dapat menyebabkan kesalahan dalam pengambilan keputusan operasional. Kesalahan tersebut dapat berdampak pada penurunan kualitas produk, peningkatan biaya produksi, serta berkurangnya efisiensi proses.

Pada sistem kontrol otomatis, keakuratan instrumen sangat menentukan keberhasilan proses pengendalian. Sensor, *transmitter*, indikator, dan pengendali harus memberikan informasi yang benar agar sistem dapat merespons perubahan kondisi proses secara tepat.

Oleh karena itu, program kalibrasi yang terencana menjadi salah satu langkah penting untuk menjaga performa sistem instrumentasi secara keseluruhan (Morris, 2021).

Penerapan kalibrasi yang konsisten juga mendukung peningkatan keandalan peralatan, memperpanjang umur operasional instrumen, serta membantu perusahaan memenuhi persyaratan regulasi dan standar mutu yang berlaku. Dengan demikian, kalibrasi tidak hanya berfungsi sebagai kegiatan teknis pengukuran, tetapi juga sebagai bagian penting dalam manajemen kualitas dan keandalan sistem industri.

9.2 Zero dan Span

9.2.1 Pengertian *Zero* dan *Span*

Dalam sistem instrumentasi, *zero* dan *span* merupakan dua parameter penting yang digunakan dalam proses kalibrasi instrumen pengukuran. *Zero* menunjukkan titik awal pengukuran atau nilai keluaran instrumen ketika tidak ada masukan yang diberikan. Sementara itu, *span* merupakan selisih antara nilai batas atas (*upper range value*) dan nilai batas bawah (*lower range value*) dari rentang pengukuran suatu instrumen.

Pengaturan *zero* dan *span* bertujuan untuk memastikan bahwa keluaran instrumen sesuai dengan nilai masukan yang sebenarnya. Apabila kedua parameter tersebut tidak dikalibrasi dengan benar, hasil pengukuran dapat mengalami penyimpangan yang menyebabkan kesalahan dalam proses pengendalian dan

pengambilan keputusan. Oleh karena itu, pemahaman mengenai konsep *zero* dan *span* menjadi dasar penting dalam kegiatan kalibrasi instrumentasi.

Dalam praktik industri, hampir seluruh instrumen pengukuran seperti *pressure transmitter*, *temperature transmitter*, *flow transmitter*, dan *level transmitter* memerlukan pengaturan *zero* dan *span* agar dapat memberikan hasil pengukuran yang akurat sesuai dengan rentang kerja yang telah ditentukan.

9.2.2 Konsep Zero dalam Kalibrasi

Zero merupakan titik referensi awal suatu instrumen ketika nilai masukan berada pada batas bawah rentang pengukuran. Pada kondisi ini, keluaran instrumen harus menunjukkan nilai yang sesuai dengan spesifikasi yang telah ditetapkan. Sebagai contoh, sebuah *pressure transmitter* dengan rentang pengukuran 0–100 psi harus menghasilkan keluaran 4 mA ketika tekanan yang diberikan sebesar 0 psi.

Kesalahan *zero* (*zero shift*) terjadi ketika keluaran instrumen pada titik nol tidak sesuai dengan nilai yang seharusnya. Kondisi ini dapat disebabkan oleh faktor usia peralatan, perubahan temperatur lingkungan, getaran, maupun kerusakan komponen internal instrumen. Apabila kesalahan *zero* tidak diperbaiki, seluruh hasil pengukuran akan mengalami pergeseran sehingga akurasi sistem menjadi menurun (Doebelin & Manik, 2019).

Oleh karena itu, pemeriksaan dan penyesuaian *zero* menjadi langkah awal yang harus dilakukan dalam proses kalibrasi. Penyesuaian ini bertujuan memastikan bahwa instrumen memiliki

titik referensi yang benar sebelum dilakukan pengaturan parameter lainnya.

9.2.3 Konsep *Span* dalam Kalibrasi

Span merupakan selisih antara nilai batas atas dan batas bawah dari rentang pengukuran suatu instrumen. Sebagai contoh, instrumen dengan rentang pengukuran 0–100 °C memiliki *span* sebesar 100 °C. Pada instrumen dengan rentang 50–250 °C, nilai *span* adalah 200 °C karena diperoleh dari selisih antara batas atas dan batas bawah pengukuran.

Dalam proses kalibrasi, pengaturan *span* dilakukan untuk memastikan bahwa perubahan masukan menghasilkan perubahan keluaran yang sesuai dengan karakteristik instrumen. Sebagai contoh, pada *transmitter* standar industri dengan keluaran 4–20 mA, nilai masukan minimum harus menghasilkan keluaran 4 mA dan nilai masukan maksimum harus menghasilkan keluaran 20 mA. Apabila keluaran maksimum tidak sesuai dengan nilai yang diharapkan, maka diperlukan penyesuaian *span*.

Kesalahan *span* biasanya menyebabkan perubahan kemiringan (*slope*) hubungan antara masukan dan keluaran instrumen. Akibatnya, kesalahan pengukuran akan semakin besar ketika nilai pengukuran mendekati batas atas rentang kerja instrumen (Bentley, 2021).

9.2.4 Hubungan *Zero* dan *Span* dalam Kalibrasi Instrumen

Zero dan *span* merupakan dua parameter yang saling berkaitan dalam proses kalibrasi. Penyesuaian *zero* dilakukan untuk memastikan titik awal pengukuran berada pada posisi yang benar,

sedangkan penyesuaian *span* dilakukan untuk memastikan rentang pengukuran sesuai dengan spesifikasi instrumen. Kedua parameter tersebut harus dikalibrasi secara berurutan agar hasil pengukuran menjadi akurat.

Dalam praktik kalibrasi, perubahan pada pengaturan *span* terkadang dapat memengaruhi nilai *zero*, begitu pula sebaliknya. Oleh karena itu, proses kalibrasi biasanya dilakukan secara berulang hingga kedua parameter berada dalam batas toleransi yang diperbolehkan. Metode ini dikenal sebagai proses iteratif yang umum digunakan dalam kalibrasi berbagai instrumen industri.

Keberhasilan pengaturan *zero* dan *span* sangat menentukan kualitas data yang diperoleh dari sistem pengukuran. Instrumen yang memiliki kesalahan pada salah satu parameter tersebut dapat menghasilkan informasi yang tidak akurat sehingga berpotensi memengaruhi kualitas produk dan efisiensi proses produksi.

9.2.5 Penerapan *Zero* dan *Span* pada Sistem Industri

Konsep *zero* dan *span* banyak diterapkan pada berbagai instrumen industri seperti *pressure transmitter*, *temperature transmitter*, *flow transmitter*, dan *level transmitter*. Pada industri proses, kalibrasi *zero* dan *span* dilakukan secara berkala untuk memastikan bahwa seluruh instrumen tetap bekerja sesuai dengan standar operasional yang berlaku.

Sebagai contoh, sebuah *pressure transmitter* dengan rentang 0–10 bar dan keluaran 4–20 mA harus menghasilkan keluaran 4 mA pada tekanan 0 bar dan 20 mA pada tekanan 10 bar. Apabila hasil pengukuran menunjukkan nilai yang berbeda dari spesifikasi

tersebut, maka diperlukan penyesuaian *zero*, *span*, atau keduanya. Proses ini dilakukan menggunakan *calibrator* yang mampu memberikan sinyal referensi dengan tingkat akurasi tinggi.

Penerapan kalibrasi *zero* dan *span* secara rutin membantu menjaga keandalan sistem instrumentasi, meningkatkan akurasi pengukuran, serta mengurangi risiko kesalahan proses yang dapat menimbulkan kerugian operasional. Oleh karena itu, penguasaan konsep *zero* dan *span* menjadi kompetensi dasar yang harus dimiliki oleh teknisi dan praktisi instrumentasi.

9.3 Standar Kalibrasi

9.3.1 Pengertian Standar Kalibrasi

Standar kalibrasi merupakan acuan pengukuran yang digunakan untuk menentukan tingkat ketepatan dan keakuratan suatu instrumen ukur. Dalam kegiatan instrumentasi industri, standar kalibrasi berfungsi sebagai referensi yang memiliki nilai pengukuran telah diketahui dan ditelusurkan (*traceable*) hingga standar nasional maupun internasional. Melalui proses kalibrasi, hasil pengukuran suatu instrumen dibandingkan dengan nilai yang dimiliki oleh standar tersebut untuk mengetahui besarnya penyimpangan atau kesalahan pengukuran.

Keberadaan standar kalibrasi sangat penting karena setiap instrumen ukur dapat mengalami perubahan karakteristik akibat pemakaian, pengaruh lingkungan, usia komponen, maupun faktor mekanis lainnya. Apabila penyimpangan pengukuran tidak

diketahui, maka kualitas data yang dihasilkan akan menurun dan dapat memengaruhi proses produksi maupun keselamatan sistem. Oleh karena itu, standar kalibrasi digunakan untuk memastikan bahwa instrumen tetap menghasilkan pengukuran yang sesuai dengan nilai sebenarnya (Doebelin & Manik, 2019).

Dalam lingkungan industri, standar kalibrasi digunakan pada berbagai instrumen seperti termometer, manometer, *flow meter*, *pressure transmitter*, timbangan, dan berbagai perangkat pengukuran lainnya. Dengan adanya standar yang jelas, hasil pengukuran dapat dibandingkan secara konsisten meskipun dilakukan pada lokasi dan waktu yang berbeda.

9.3.2 Hirarki Standar Kalibrasi

Standar kalibrasi memiliki struktur hirarki yang bertujuan menjaga keterlacakan (*traceability*) hasil pengukuran. Pada tingkat tertinggi terdapat standar internasional yang dikelola oleh organisasi metrologi dunia dan digunakan sebagai acuan utama dalam sistem pengukuran global. Standar ini menjadi dasar bagi pengembangan standar nasional yang digunakan oleh lembaga metrologi di masing-masing negara.

Di bawah standar nasional terdapat standar referensi yang dimiliki oleh laboratorium kalibrasi terakreditasi. Standar referensi digunakan untuk mengkalibrasi standar kerja yang digunakan dalam kegiatan pengujian dan pemeliharaan instrumen sehari-hari. Dengan sistem hirarki tersebut, setiap hasil pengukuran dapat ditelusuri hingga standar internasional melalui rantai kalibrasi yang terdokumentasi dengan baik.

Konsep keterlacakan sangat penting dalam dunia industri karena menjamin bahwa hasil pengukuran memiliki dasar yang dapat dipertanggungjawabkan. Keterlacakan memungkinkan hasil pengukuran dari berbagai laboratorium dan organisasi dibandingkan secara objektif sehingga meningkatkan kepercayaan terhadap data yang dihasilkan (Morris & Langari, 2021).

9.3.3 Jenis-Jenis Standar Kalibrasi

Standar kalibrasi dapat diklasifikasikan berdasarkan fungsi dan tingkat penggunaannya. Standar primer (*primary standard*) merupakan standar dengan tingkat akurasi tertinggi yang digunakan sebagai acuan utama dalam sistem pengukuran. Standar ini biasanya dipelihara oleh lembaga metrologi nasional dan digunakan untuk menetapkan nilai pengukuran yang menjadi dasar bagi standar lainnya.

Selanjutnya terdapat standar sekunder (*secondary standard*) yang dikalibrasi menggunakan standar primer dan digunakan pada laboratorium kalibrasi maupun institusi teknis tertentu. Standar sekunder memiliki tingkat akurasi yang sangat tinggi meskipun berada satu tingkat di bawah standar primer. Dalam kegiatan operasional sehari-hari, industri umumnya menggunakan standar kerja (*working standard*) yang telah dikalibrasi terhadap standar sekunder sehingga tetap memiliki keterlacakan yang jelas.

Bentuk standar kalibrasi juga sangat beragam sesuai dengan jenis besaran yang diukur. Pada pengukuran tekanan digunakan *dead weight tester*, pada pengukuran suhu digunakan *dry block calibrator* atau *temperature bath*, sedangkan pada pengukuran listrik

digunakan sumber tegangan dan arus standar. Pemilihan standar kalibrasi harus disesuaikan dengan jenis instrumen yang akan diuji agar hasil kalibrasi dapat memberikan tingkat akurasi yang optimal.

9.3.4 Penerapan Standar Kalibrasi dalam Industri

Dalam sistem industri modern, penerapan standar kalibrasi merupakan bagian penting dari program jaminan mutu dan pemeliharaan instrumen. Setiap instrumen yang digunakan untuk pengukuran proses harus dikalibrasi secara berkala guna memastikan bahwa hasil pengukurannya tetap berada dalam batas toleransi yang diizinkan. Frekuensi kalibrasi biasanya ditentukan berdasarkan tingkat penggunaan instrumen, kondisi lingkungan kerja, serta persyaratan standar mutu yang berlaku.

Pada industri manufaktur, standar kalibrasi digunakan untuk memastikan kualitas produk tetap sesuai spesifikasi. Dalam industri farmasi dan makanan, akurasi instrumen pengukuran menjadi sangat penting karena berhubungan langsung dengan keamanan dan kualitas produk yang dihasilkan. Sementara itu, pada industri minyak dan gas, kalibrasi instrumen tekanan, temperatur, dan aliran berperan penting dalam menjaga keselamatan operasi serta efisiensi proses produksi.

Penerapan standar kalibrasi yang baik juga mendukung pemenuhan persyaratan sistem manajemen mutu seperti ISO 9001 dan ISO/IEC 17025. Melalui proses kalibrasi yang terdokumentasi dan memiliki keterlacakan yang jelas, perusahaan dapat meningkatkan keandalan data pengukuran, mengurangi risiko kesalahan proses, serta meningkatkan kepercayaan pelanggan.

terhadap kualitas produk dan layanan yang diberikan. Oleh karena itu, standar kalibrasi menjadi salah satu elemen fundamental dalam pengelolaan sistem instrumentasi dan pengukuran industri.

9.4 Prosedur Dasar Kalibrasi

9.4.1 Pengertian dan Tujuan Kalibrasi

Kalibrasi merupakan proses membandingkan hasil pengukuran suatu instrumen dengan standar acuan yang memiliki tingkat ketelitian lebih tinggi untuk mengetahui besarnya penyimpangan (*error*) yang terjadi (Gandhi et al., 2020). Dalam bidang instrumentasi, kalibrasi dilakukan untuk memastikan bahwa instrumen mampu menghasilkan data pengukuran yang akurat, konsisten, dan sesuai dengan spesifikasi yang ditetapkan. Proses ini sangat penting karena ketidakakuratan instrumen dapat menyebabkan kesalahan pengendalian proses, penurunan kualitas produk, hingga potensi gangguan terhadap keselamatan operasional.

Tujuan utama kalibrasi adalah menentukan hubungan antara nilai yang ditunjukkan oleh instrumen dan nilai referensi yang diberikan oleh standar kalibrasi. Melalui proses tersebut, dapat diketahui apakah instrumen masih berada dalam batas toleransi yang diperbolehkan atau memerlukan penyetelan ulang (*adjustment*). Selain itu, kalibrasi juga berfungsi untuk menjaga keandalan sistem pengukuran, memenuhi persyaratan standar mutu, serta mendukung konsistensi hasil pengukuran dalam kegiatan operasional maupun pemeliharaan peralatan industri (Doebelin & Manik, 2019).

9.4.2 Tahapan Pelaksanaan Kalibrasi

Prosedur dasar kalibrasi diawali dengan persiapan instrumen dan peralatan standar yang akan digunakan. Instrumen yang akan dikalibrasi harus berada dalam kondisi baik, bersih, dan telah diperiksa secara visual untuk memastikan tidak terdapat kerusakan fisik yang dapat memengaruhi hasil pengukuran. Selain itu, standar kalibrasi yang digunakan harus memiliki ketertelusuran (*traceability*) terhadap standar nasional maupun internasional sehingga hasil kalibrasi dapat dipertanggungjawabkan.

Tahap berikutnya adalah pemberian nilai masukan atau referensi pada beberapa titik pengukuran sesuai rentang kerja instrumen. Nilai yang ditunjukkan oleh instrumen kemudian dicatat dan dibandingkan dengan nilai standar. Selisih antara kedua nilai tersebut digunakan untuk menentukan besarnya kesalahan pengukuran. Pengujian biasanya dilakukan pada beberapa titik pengukuran, misalnya 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100% dari rentang instrumen, sehingga karakteristik kinerja alat dapat dievaluasi secara menyeluruh.

Setelah seluruh data diperoleh, dilakukan analisis terhadap hasil pengukuran untuk menentukan apakah instrumen masih memenuhi batas toleransi yang ditetapkan. Apabila penyimpangan yang terjadi melebihi batas yang diizinkan, maka instrumen perlu dilakukan penyetelan atau perbaikan sebelum digunakan kembali. Dokumentasi hasil kalibrasi juga harus dibuat sebagai bukti bahwa proses kalibrasi telah dilaksanakan sesuai prosedur yang berlaku (Bentley, 2021).

9.4.3 Dokumentasi dan Evaluasi Hasil Kalibrasi

Dokumentasi merupakan bagian penting dalam prosedur kalibrasi karena seluruh hasil pengukuran harus dicatat secara sistematis. Data yang umumnya dicantumkan dalam laporan kalibrasi meliputi identitas instrumen, nomor seri, tanggal pelaksanaan, standar yang digunakan, hasil pengukuran, nilai kesalahan, serta status kelayakan instrumen. Dokumentasi tersebut berfungsi sebagai rekaman historis yang dapat digunakan untuk pemantauan kinerja instrumen dari waktu ke waktu.

Evaluasi hasil kalibrasi dilakukan dengan membandingkan nilai kesalahan yang diperoleh terhadap batas toleransi yang telah ditentukan. Instrumen yang masih berada dalam batas toleransi dapat dinyatakan layak digunakan, sedangkan instrumen yang berada di luar batas toleransi memerlukan tindakan korektif berupa penyetelan, perbaikan, atau penggantian komponen tertentu. Evaluasi ini sangat penting untuk memastikan bahwa sistem pengukuran tetap mampu memberikan data yang akurat dan andal selama digunakan dalam proses industri.

Selain mendukung keakuratan pengukuran, dokumentasi dan evaluasi hasil kalibrasi juga berperan dalam memenuhi persyaratan sistem manajemen mutu yang diterapkan di berbagai sektor industri. Oleh karena itu, pelaksanaan kalibrasi secara berkala dan terdokumentasi dengan baik menjadi salah satu langkah penting dalam menjaga kualitas sistem instrumentasi dan menjamin keandalan proses pengukuran yang dilakukan.

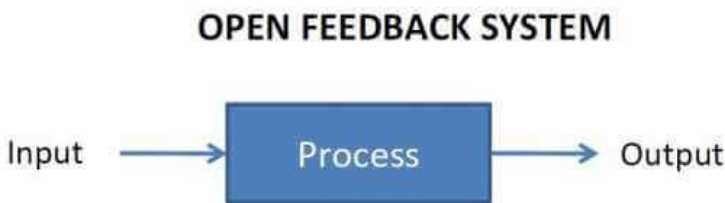
Bab 10: Dasar Sistem Kontrol

Ir. Pippie Arbiyanti, M.Eng.

10.1 Open Loop Control System

10.1.1 Pengertian *Open Loop Control System*

Open loop control system atau sistem kendali terbuka merupakan sistem pengendalian yang bekerja tanpa menggunakan sinyal umpan balik (*feedback*) dari keluaran menuju pengendali. Pada sistem ini, aksi pengendalian ditentukan hanya berdasarkan masukan (*input*) yang diberikan tanpa mempertimbangkan kondisi aktual keluaran (*output*). Akibatnya, sistem tidak dapat melakukan koreksi secara otomatis apabila terjadi gangguan atau perubahan kondisi selama proses berlangsung (Bolton, 2021).



Gambar 10.1. Open Loop

Sumber: <https://share.google/4yKwMQ1yT97UgV29n>

Dalam sistem kendali terbuka, hubungan antara masukan dan keluaran berlangsung secara satu arah. Pengendali memberikan perintah kepada aktuator untuk melaksanakan suatu operasi sesuai program yang telah ditentukan sebelumnya. Setelah perintah

dijalankan, sistem tidak melakukan pemeriksaan apakah keluaran yang dihasilkan telah sesuai dengan target yang diinginkan. Oleh karena itu, kinerja sistem sangat bergantung pada ketepatan pengaturan awal dan kestabilan kondisi operasi.

Konsep kendali terbuka banyak digunakan pada aplikasi yang memiliki urutan kerja sederhana dan tidak memerlukan pengawasan keluaran secara terus-menerus. Sistem ini relatif mudah dirancang, dioperasikan, dan dipelihara sehingga masih banyak diterapkan dalam berbagai proses otomasi industri.

10.1.2 Karakteristik *Open Loop Control System*

Salah satu karakteristik utama sistem kendali terbuka adalah tidak adanya mekanisme umpan balik yang menghubungkan keluaran dengan pengendali. Karena tidak menerima informasi mengenai kondisi keluaran, sistem tidak mampu mendeteksi kesalahan maupun melakukan penyesuaian secara otomatis terhadap perubahan yang terjadi selama proses berlangsung (Nise, 2020).

Karakteristik lainnya adalah struktur sistem yang relatif sederhana. Komponen utama pada sistem kendali terbuka umumnya terdiri atas sumber masukan, pengendali, aktuator, dan proses yang dikendalikan. Kesederhanaan struktur tersebut menyebabkan biaya implementasi menjadi lebih rendah dibandingkan sistem kendali tertutup (*closed loop control system*).

Sistem kendali terbuka juga memiliki respons yang cepat karena tidak memerlukan proses perbandingan antara keluaran dan nilai acuan (*set point*). Namun, keunggulan ini diikuti oleh keterbatasan dalam hal akurasi. Apabila terjadi gangguan dari

lingkungan atau perubahan karakteristik sistem, keluaran yang dihasilkan dapat menyimpang dari kondisi yang diharapkan tanpa adanya mekanisme koreksi otomatis.

Dalam sistem otomasi industri, beberapa proses sekuensial sederhana sering menggunakan prinsip kendali terbuka, yaitu proses yang dijalankan berdasarkan urutan langkah yang telah ditentukan sebelumnya tanpa memerlukan evaluasi keluaran secara berkelanjutan. Sistem kendali sekuensial bekerja berdasarkan keputusan gerakan yang dilakukan secara berurutan sesuai logika operasi yang telah dirancang dalam *ladder diagram* atau program kontrol lainnya.

10.1.3 Prinsip Kerja *Open Loop Control System*

Prinsip kerja sistem kendali terbuka dimulai ketika masukan diberikan kepada pengendali. Pengendali kemudian menghasilkan sinyal kendali yang diteruskan ke aktuator untuk menjalankan suatu tindakan pada proses. Setelah proses berlangsung, keluaran dihasilkan tanpa adanya pengukuran atau evaluasi yang dikirim kembali ke pengendali (Bolton, 2021).

Sebagai contoh, sebuah sistem penggerak motor yang dioperasikan menggunakan sakelar sederhana akan bekerja selama sakelar berada pada posisi aktif. Sistem tidak memiliki kemampuan untuk mengetahui apakah kecepatan motor telah sesuai dengan kebutuhan atau mengalami perubahan akibat variasi beban. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa seluruh proses pengendalian dilakukan tanpa memanfaatkan informasi keluaran.

Konsep serupa juga dapat ditemukan pada sistem kendali sekuensial dasar yang bekerja berdasarkan urutan perintah tertentu. Dalam modul pelatihan kendali sekuensial dijelaskan bahwa keputusan gerakan pada kendali sekuensial dilakukan secara berurutan sesuai tahapan yang telah ditentukan dalam diagram sekuensial maupun *ladder diagram*.

10.1.4 Aplikasi *Open Loop Control System*

Sistem kendali terbuka banyak digunakan pada aplikasi yang memiliki kondisi operasi relatif stabil dan tidak memerlukan tingkat akurasi yang sangat tinggi. Contoh penerapannya antara lain sistem pengatur waktu (*timer*), mesin pencuci otomatis sederhana, sistem penyalan lampu berbasis waktu, serta berbagai proses otomasi yang bekerja berdasarkan urutan operasi tertentu (Nise, 2020).

Dalam sistem elektropneumatik, proses sekuensial juga sering menggunakan prinsip kendali terbuka pada tahap-tahap tertentu. Sebagai contoh, silinder pneumatik dapat bergerak maju dan mundur mengikuti urutan operasi yang telah ditentukan berdasarkan aktivasi tombol dan sensor batas (*limit switch*). Urutan tersebut kemudian diterjemahkan ke dalam *ladder diagram* untuk mengendalikan aktuator sesuai langkah operasi yang telah dirancang.

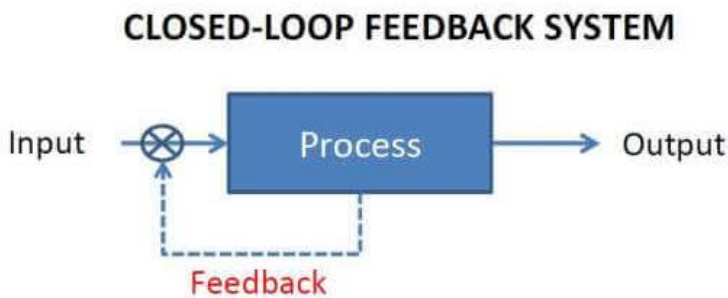
Pada sistem berbasis *Programmable Logic Controller* (PLC), prinsip kendali terbuka juga digunakan untuk menjalankan proses yang tidak memerlukan koreksi keluaran secara kontinu. Program PLC akan mengeksekusi instruksi sesuai logika yang telah dibuat tanpa melakukan pengendalian berbasis umpan balik apabila

sensor keluaran tidak digunakan sebagai bagian dari sistem kontrol. Dengan demikian, sistem kendali terbuka tetap memiliki peran penting dalam berbagai aplikasi otomasi industri yang mengutamakan kesederhanaan, kecepatan operasi, dan biaya implementasi yang rendah.

10.2 Closed Loop

10.2.1 Pengertian *Closed Loop*

Closed loop atau sistem kendali tertutup merupakan sistem kontrol yang menggunakan sinyal umpan balik (*feedback*) untuk membandingkan keluaran aktual dengan nilai yang diinginkan (*set point*). Hasil perbandingan tersebut digunakan untuk melakukan koreksi secara otomatis sehingga keluaran sistem dapat dipertahankan sesuai dengan target yang telah ditentukan. Berbeda dengan sistem *open loop* yang bekerja tanpa memperhatikan kondisi keluaran, sistem *closed loop* selalu memantau hasil proses dan melakukan penyesuaian apabila terjadi penyimpangan (Bolton, 2021).



Gambar 10.2. Closed Loop

Sumber: <https://share.google/4yKwMQ1yT97UgV29n>

Dalam dunia industri, sistem *closed loop* banyak digunakan karena mampu menghasilkan pengendalian yang lebih akurat dan stabil. Penerapan sistem ini dapat ditemukan pada pengendalian suhu, tekanan, kecepatan motor, level cairan, dan berbagai proses manufaktur lainnya yang memerlukan tingkat ketelitian tinggi. Kemampuan sistem untuk mengoreksi kesalahan secara otomatis menjadikan *closed loop* sebagai metode pengendalian yang paling banyak digunakan dalam sistem otomasi modern.

10.2.2 Komponen Sistem *Closed Loop*

Sistem *closed loop* terdiri atas beberapa komponen utama yang saling terhubung untuk membentuk suatu mekanisme pengendalian otomatis. Komponen pertama adalah *set point*, yaitu nilai acuan yang menjadi target pengendalian. Nilai ini merupakan kondisi yang diinginkan oleh operator atau sistem.

Komponen berikutnya adalah sensor yang berfungsi mengukur kondisi aktual proses. Data hasil pengukuran kemudian dikirim ke pengendali (*controller*) untuk dibandingkan dengan nilai *set point*. Selisih antara nilai yang diinginkan dan nilai aktual disebut sebagai *error*. Pengendali akan memproses nilai *error* tersebut dan menghasilkan sinyal kendali yang diteruskan ke aktuator agar proses dapat kembali menuju kondisi yang diinginkan (Morris, 2020).

Aktuator berfungsi sebagai elemen pelaksana yang melakukan tindakan koreksi terhadap sistem. Setelah perubahan dilakukan, sensor kembali mengukur kondisi proses sehingga

terbentuk siklus umpan balik yang berlangsung secara terus-menerus selama sistem beroperasi.

10.2.3 Prinsip Kerja *Closed Loop*

Prinsip kerja sistem *closed loop* diawali dengan penetapan nilai *set point* sebagai target pengendalian. Sensor kemudian mengukur kondisi aktual dari proses yang sedang berlangsung dan mengirimkan data tersebut ke pengendali. Pengendali akan membandingkan nilai aktual dengan nilai *set point* untuk menentukan besarnya *error* yang terjadi.

Apabila terdapat perbedaan antara nilai aktual dan nilai yang diinginkan, pengendali akan menghasilkan sinyal koreksi untuk menggerakkan aktuator. Aktuator kemudian melakukan penyesuaian terhadap proses sehingga nilai keluaran mendekati atau sama dengan nilai *set point*. Proses ini berlangsung secara berulang sehingga sistem mampu mempertahankan kondisi operasi yang stabil meskipun terjadi gangguan dari lingkungan maupun perubahan beban (Nise, 2020).

Prinsip umpan balik tersebut menjadi karakteristik utama sistem *closed loop*. Dengan adanya *feedback*, sistem dapat mendeteksi kesalahan dan memperbaikinya secara otomatis tanpa memerlukan intervensi operator secara terus-menerus.

10.2.4 Penerapan *Closed Loop* dalam Industri

Sistem *closed loop* memiliki berbagai aplikasi dalam lingkungan industri. Salah satu contoh yang paling umum adalah sistem pengendalian suhu pada *furnace* atau oven industri. Sensor suhu mengukur temperatur aktual dan mengirimkan data ke

pengendali. Jika suhu lebih rendah dari *set point*, pengendali akan meningkatkan daya pemanas hingga suhu mencapai nilai yang diinginkan.

Aplikasi lainnya adalah pengendalian kecepatan motor listrik menggunakan *Variable Frequency Drive* (VFD). Sensor kecepatan memberikan informasi mengenai putaran motor secara real-time sehingga pengendali dapat menyesuaikan frekuensi keluaran untuk mempertahankan kecepatan yang telah ditentukan. Sistem serupa juga digunakan pada pengendalian tekanan, level cairan, dan aliran fluida dalam berbagai proses industri (Bolton, 2021).

Dalam sistem otomasi berbasis PLC, konsep *closed loop* sering dipadukan dengan kendali logika dan kendali sekuensial untuk menghasilkan proses produksi yang lebih efisien dan otomatis. Materi kendali sekuensial menjelaskan bahwa sistem otomasi industri umumnya merupakan kombinasi antara berbagai metode pengendalian yang saling mendukung dalam mengatur jalannya proses produksi.

10.2.5 Keunggulan dan Keterbatasan *Closed Loop*

Sistem *closed loop* memiliki beberapa keunggulan dibandingkan sistem *open loop*. Keunggulan utama sistem ini adalah kemampuannya mempertahankan akurasi dan stabilitas proses meskipun terjadi gangguan eksternal maupun perubahan kondisi operasi. Selain itu, sistem *closed loop* mampu mengurangi kesalahan pengendalian karena selalu melakukan koreksi berdasarkan data aktual yang diperoleh dari sensor.

Keunggulan lainnya adalah peningkatan efisiensi proses dan kualitas produk karena parameter operasi dapat dijaga pada nilai yang diinginkan. Kemampuan ini sangat penting dalam industri yang memerlukan tingkat presisi tinggi, seperti industri kimia, farmasi, makanan dan minuman, serta manufaktur otomatis.

Meskipun demikian, sistem *closed loop* memiliki kompleksitas yang lebih tinggi dibandingkan sistem *open loop*. Kebutuhan sensor, pengendali, dan perangkat umpan balik menyebabkan biaya instalasi dan pemeliharaan menjadi lebih besar. Selain itu, kesalahan pada sensor atau komponen umpan balik dapat memengaruhi kinerja keseluruhan sistem sehingga diperlukan program pemeliharaan dan kalibrasi secara berkala (Nise, 2020).

10.3 Feedback

10.3.1 Pengertian *Feedback* dalam Sistem Kontrol

Feedback atau umpan balik merupakan konsep dasar dalam sistem kontrol yang digunakan untuk membandingkan keluaran (*output*) aktual suatu sistem dengan nilai yang diinginkan (*set point*). Informasi mengenai kondisi keluaran tersebut kemudian dikirim kembali ke bagian pengendali untuk digunakan sebagai dasar dalam melakukan koreksi terhadap proses yang sedang berlangsung. Dengan adanya *feedback*, sistem dapat menyesuaikan operasinya secara otomatis sehingga keluaran yang dihasilkan tetap sesuai dengan target yang telah ditentukan.

Dalam dunia industri, sistem kontrol berbasis *feedback* banyak digunakan pada pengendalian suhu, tekanan, level cairan, kecepatan motor, dan berbagai proses produksi lainnya. Keunggulan utama sistem ini adalah kemampuannya mendeteksi penyimpangan yang terjadi selama operasi dan melakukan tindakan korektif secara otomatis. Oleh karena itu, *feedback* menjadi elemen penting dalam menjaga stabilitas, akurasi, dan keandalan sistem kontrol modern.

Pada sistem otomasi, informasi yang berasal dari sensor digunakan sebagai sinyal umpan balik untuk menunjukkan kondisi aktual proses. Data tersebut kemudian diproses oleh pengendali sehingga sistem dapat menentukan apakah diperlukan perubahan terhadap aktuator atau perangkat keluaran lainnya untuk mencapai kondisi yang diinginkan.

10.3.2 Prinsip Kerja Sistem *Feedback*

Prinsip kerja sistem *feedback* diawali dengan pengukuran kondisi aktual proses menggunakan sensor. Nilai hasil pengukuran tersebut kemudian dibandingkan dengan nilai referensi atau *set point* yang telah ditentukan sebelumnya. Selisih antara nilai aktual dan nilai referensi disebut sebagai kesalahan (*error*). Besarnya kesalahan inilah yang menjadi dasar bagi pengendali untuk menentukan tindakan koreksi terhadap sistem.

Apabila nilai keluaran lebih rendah atau lebih tinggi dari nilai yang diinginkan, pengendali akan mengirimkan sinyal ke aktuator untuk menyesuaikan kondisi proses hingga kesalahan dapat diperkecil. Siklus pengukuran, perbandingan, dan koreksi ini berlangsung secara terus-menerus sehingga sistem mampu

mempertahankan kinerja yang stabil meskipun terjadi gangguan dari lingkungan atau perubahan kondisi operasi (Dorf & Bishop, 2022).

Dalam praktik industri, sensor memainkan peran penting dalam sistem *feedback* karena berfungsi menyediakan informasi yang akurat mengenai kondisi proses. Tanpa adanya data umpan balik yang tepat, pengendali tidak akan mampu melakukan penyesuaian secara efektif sehingga kualitas pengendalian dapat menurun.

10.3.3 Jenis-Jenis *Feedback*

Berdasarkan pengaruhnya terhadap sinyal masukan, *feedback* dapat dibedakan menjadi *negative feedback* dan *positive feedback*. *Negative feedback* merupakan jenis umpan balik yang paling banyak digunakan dalam sistem kontrol industri. Pada sistem ini, sinyal umpan balik digunakan untuk mengurangi kesalahan antara keluaran aktual dan nilai referensi. Akibatnya, sistem menjadi lebih stabil, akurat, dan mampu mempertahankan kinerja yang konsisten dalam jangka panjang.

Sebaliknya, *positive feedback* adalah sistem umpan balik yang memperkuat perubahan yang terjadi pada keluaran. Pada kondisi tertentu, *positive feedback* dapat digunakan untuk meningkatkan sensitivitas sistem atau menghasilkan aksi tertentu secara cepat. Namun, apabila tidak dirancang dengan baik, sistem ini dapat menyebabkan ketidakstabilan karena penyimpangan yang terjadi akan terus diperbesar.

Dalam sistem kendali industri, penggunaan *negative feedback* jauh lebih umum dibandingkan *positive feedback* karena

memberikan kemampuan pengendalian yang lebih baik terhadap variabel proses. Berbagai sistem otomasi modern mengandalkan prinsip ini untuk menjaga kualitas produk dan efisiensi operasi produksi.

10.3.4 Penerapan *Feedback* dalam Sistem Kontrol Industri

Penerapan *feedback* dapat ditemukan pada hampir seluruh sistem kontrol industri. Pada sistem pengendalian suhu, sensor temperatur mengukur suhu aktual suatu proses dan mengirimkan data tersebut kepada pengendali. Apabila suhu yang terukur berbeda dari nilai yang diinginkan, pengendali akan menyesuaikan kerja elemen pemanas atau pendingin hingga suhu kembali mencapai nilai target.

Pada sistem pengendalian level cairan, sensor level memberikan informasi mengenai tinggi permukaan cairan dalam tangki. Data tersebut digunakan untuk mengatur kerja pompa atau katup sehingga level cairan tetap berada pada rentang yang telah ditentukan. Prinsip yang sama juga diterapkan pada pengendalian tekanan, aliran, dan kecepatan motor dalam berbagai aplikasi industri.

Konsep *feedback* juga banyak digunakan dalam sistem otomasi berbasis PLC dan *Distributed Control System* (DCS). Pada sistem kendali sekuensial, sensor seperti *limit switch* digunakan untuk memberikan informasi mengenai posisi aktuator sehingga urutan operasi dapat berjalan sesuai logika yang telah dirancang. Materi pelatihan kendali sekuensial menunjukkan bahwa informasi dari tombol *start*, *limit switch*, dan aktuator digunakan sebagai

bagian dari proses pengendalian berurutan melalui *ladder diagram* untuk memastikan setiap tahapan operasi berlangsung sesuai urutan yang ditentukan. Dengan demikian, *feedback* berperan penting dalam meningkatkan akurasi, keamanan, dan efisiensi sistem kontrol industri.

10.4 Setpoint

10.4.1 Pengertian Setpoint

Setpoint merupakan nilai target yang ditetapkan dalam suatu sistem kontrol sebagai acuan untuk mempertahankan kondisi proses pada tingkat yang diinginkan. Dalam sistem kendali industri, *setpoint* digunakan sebagai nilai referensi yang akan dibandingkan dengan nilai aktual yang diperoleh dari sensor atau perangkat pengukuran. Perbedaan antara nilai aktual dan nilai target akan menghasilkan sinyal kesalahan (*error*) yang kemudian diproses oleh pengendali untuk menentukan tindakan koreksi yang diperlukan.

Konsep *setpoint* banyak diterapkan pada berbagai sistem pengendalian proses, seperti pengaturan suhu, tekanan, laju aliran, level cairan, dan kecepatan motor. Sebagai contoh, apabila suatu proses produksi memerlukan suhu operasi sebesar 80°C, maka nilai tersebut ditetapkan sebagai *setpoint*. Sistem kontrol akan terus memantau suhu aktual dan melakukan penyesuaian terhadap elemen pengendali agar suhu tetap berada pada nilai yang telah ditentukan. Dengan demikian, *setpoint* berfungsi sebagai parameter utama yang menentukan tujuan pengendalian suatu proses (Nise, 2020).

10.4.2 Peran Setpoint dalam Sistem Kontrol

Dalam sistem kontrol tertutup (*closed-loop control system*), *setpoint* memiliki peran penting sebagai dasar pengambilan keputusan oleh pengendali. Sensor akan mengukur kondisi aktual proses dan mengirimkan informasi tersebut ke pengendali. Selanjutnya, pengendali membandingkan nilai aktual dengan *setpoint* untuk menentukan apakah diperlukan tindakan koreksi. Apabila terdapat penyimpangan, sistem akan mengatur aktuator agar kondisi proses kembali mendekati nilai target yang diinginkan.

Keberadaan *setpoint* memungkinkan sistem kontrol bekerja secara otomatis tanpa memerlukan intervensi operator secara terus-menerus. Semakin kecil perbedaan antara nilai aktual dan *setpoint*, semakin baik performa sistem pengendalian yang dihasilkan. Oleh karena itu, ketepatan penentuan nilai *setpoint* sangat berpengaruh terhadap stabilitas, efisiensi, dan kualitas proses industri.

Pada sistem pengendalian modern, *setpoint* juga dapat digunakan sebagai parameter untuk mengatur urutan operasi dalam sistem otomatis. Nilai target tertentu dapat menjadi pemicu perubahan kondisi operasi, perpindahan tahap proses, atau aktivasi perangkat tertentu sesuai kebutuhan sistem. Hal ini menunjukkan bahwa *setpoint* tidak hanya berfungsi sebagai nilai referensi pengukuran, tetapi juga sebagai bagian dari strategi pengendalian yang lebih kompleks.

10.4.3 Pengaturan Setpoint pada Aplikasi Industri

Pengaturan *setpoint* dapat dilakukan secara manual maupun otomatis tergantung pada jenis sistem kontrol yang digunakan. Pada sistem sederhana, operator memasukkan nilai *setpoint* melalui panel kontrol atau *Human Machine Interface* (HMI). Nilai tersebut kemudian digunakan oleh pengendali untuk mempertahankan kondisi proses pada tingkat yang telah ditentukan. Metode ini umum diterapkan pada sistem yang memiliki kondisi operasi relatif tetap dan tidak memerlukan perubahan parameter secara berkala.

Pada sistem industri yang lebih kompleks, nilai *setpoint* dapat berubah secara otomatis berdasarkan kondisi operasi, jadwal produksi, atau instruksi dari sistem pengendalian tingkat yang lebih tinggi. Sebagai contoh, pada sistem pengendalian suhu bertingkat, nilai *setpoint* dapat disesuaikan secara otomatis sesuai tahap proses yang sedang berlangsung. Pendekatan ini memungkinkan sistem bekerja lebih fleksibel dan mampu beradaptasi terhadap perubahan kebutuhan produksi.

Penerapan *setpoint* banyak dijumpai pada berbagai sektor industri, seperti pengaturan suhu pada *heat exchanger*, pengendalian tekanan pada sistem perpipaan, pengaturan level cairan pada tangki penyimpanan, serta pengendalian kecepatan motor menggunakan *Variable Frequency Drive* (VFD). Pada aplikasi tersebut, nilai *setpoint* menjadi parameter utama yang menentukan kinerja sistem kontrol. Menurut Ogata (2021), keberhasilan suatu sistem kendali

sangat dipengaruhi oleh kemampuan pengendali dalam mempertahankan variabel proses agar tetap berada sedekat mungkin dengan nilai *setpoint* yang telah ditentukan. Oleh karena itu, pemahaman mengenai konsep dan penerapan *setpoint* menjadi dasar penting dalam mempelajari sistem kontrol industri.

10.5 Error System

10.5.1 Pengertian *Error System*

Error system merupakan selisih atau perbedaan antara nilai yang diinginkan (*set point*) dengan nilai keluaran aktual (*actual output*) dari suatu sistem kontrol. Dalam sistem kendali, keberadaan *error* menjadi indikator utama yang menunjukkan apakah sistem telah bekerja sesuai dengan target yang ditentukan. Apabila nilai keluaran sama dengan nilai yang diinginkan, maka *error* bernilai nol dan sistem dianggap berada dalam kondisi ideal. Sebaliknya, semakin besar perbedaan antara keluaran aktual dan nilai acuan, semakin besar pula nilai *error* yang terjadi.

Pada sistem kontrol industri, *error* digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan oleh pengendali (*controller*). Informasi mengenai besar kecilnya *error* akan diproses untuk menghasilkan tindakan koreksi sehingga keluaran sistem dapat kembali mendekati nilai yang diharapkan. Oleh karena itu, konsep *error* menjadi elemen penting dalam seluruh proses pengendalian otomatis. Menurut Nise (2020), tujuan utama sistem kontrol adalah meminimalkan *error*

sehingga kinerja sistem dapat memenuhi spesifikasi yang telah ditentukan.

10.5.2 Penyebab Terjadinya *Error System*

Terjadinya *error* dalam suatu sistem kontrol dapat disebabkan oleh berbagai faktor yang memengaruhi hubungan antara masukan dan keluaran sistem. Salah satu penyebab utama adalah adanya gangguan (*disturbance*) yang berasal dari lingkungan luar maupun perubahan kondisi operasi. Gangguan tersebut dapat menyebabkan keluaran sistem menyimpang dari nilai yang telah ditetapkan sehingga menghasilkan *error*.

Selain gangguan eksternal, *error* juga dapat muncul akibat keterbatasan komponen sistem, seperti sensor yang kurang akurat, aktuator yang mengalami keausan, atau pengendali yang memiliki parameter pengaturan yang kurang tepat. Dalam sistem industri, keterlambatan respon (*time delay*) sering menjadi faktor yang menyebabkan keluaran tidak dapat mengikuti perubahan masukan secara cepat. Akibatnya, sistem memerlukan waktu tertentu untuk mencapai kondisi yang diinginkan.

Kesalahan kalibrasi instrumen, perubahan karakteristik proses, serta kesalahan pemrograman pada sistem kontrol juga dapat meningkatkan nilai *error*. Oleh karena itu, seluruh komponen dalam sistem kendali harus dirancang dan dipelihara dengan baik agar penyimpangan yang terjadi dapat diminimalkan.

10.5.3 Jenis-Jenis *Error System*

Dalam teori sistem kontrol, *error* dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis berdasarkan karakteristiknya. Salah satu jenis yang paling umum adalah *steady-state error*, yaitu *error* yang masih tersisa setelah sistem mencapai kondisi stabil. Jenis *error* ini sering digunakan sebagai indikator tingkat ketelitian suatu sistem kontrol dalam mempertahankan nilai keluaran pada kondisi operasi tertentu.

Jenis berikutnya adalah *transient error*, yaitu *error* yang muncul selama proses transisi dari satu kondisi ke kondisi lainnya. *Transient error* biasanya terjadi ketika sistem menerima perubahan masukan secara tiba-tiba sehingga keluaran memerlukan waktu untuk menyesuaikan diri terhadap kondisi baru. Selain itu, terdapat pula *tracking error*, yaitu perbedaan antara sinyal referensi yang berubah terhadap waktu dan keluaran aktual sistem.

Menurut Ogata (2021), analisis terhadap berbagai jenis *error* sangat penting dalam proses perancangan sistem kontrol karena dapat digunakan untuk mengevaluasi tingkat kestabilan, ketelitian, dan kemampuan respons sistem terhadap perubahan kondisi operasi. Dengan memahami karakteristik *error*, perancang dapat menentukan strategi pengendalian yang lebih efektif.

10.5.4 Pengurangan *Error* pada Sistem Kontrol

Pengurangan *error* merupakan tujuan utama dalam perancangan dan pengoperasian sistem kontrol. Salah satu metode yang paling banyak digunakan adalah penerapan pengendali umpan balik (*feedback control*). Pada sistem ini, keluaran aktual diukur dan

dibandingkan dengan nilai acuan sehingga *error* yang terjadi dapat digunakan sebagai dasar tindakan koreksi secara otomatis.

Penggunaan pengendali PID (*Proportional-Integral-Derivative*) juga menjadi metode yang umum diterapkan untuk mengurangi *error*. Komponen proporsional berfungsi merespons besarnya *error*, komponen integral mengurangi *steady-state error*, sedangkan komponen derivatif membantu mempercepat respons dan meningkatkan stabilitas sistem. Kombinasi ketiga komponen tersebut memungkinkan sistem mencapai performa yang lebih baik dalam berbagai kondisi operasi.

Selain melalui pengaturan parameter kontrol, pengurangan *error* juga dapat dilakukan dengan meningkatkan kualitas sensor, melakukan kalibrasi secara berkala, memperbaiki sistem aktuator, serta mengurangi pengaruh gangguan eksternal. Dalam sistem otomasi modern, pemanfaatan teknologi digital dan algoritma kontrol cerdas semakin meningkatkan kemampuan sistem dalam mendeteksi dan mengoreksi *error* secara cepat dan akurat. Dengan demikian, kinerja sistem dapat dipertahankan pada tingkat yang optimal sesuai kebutuhan proses industri.

Bab 11: Sistem Kontrol

Sekuensial

Ir. Pippie Arbiyanti, M.Eng.

11.1 Sequence Control

11.1.1 Pengertian *Sequence Control*

Sequence control atau kendali sekuensial merupakan metode pengendalian yang mengatur jalannya suatu proses berdasarkan urutan langkah kerja yang telah ditentukan sebelumnya. Pada sistem ini, setiap aksi atau gerakan akan dilaksanakan secara bertahap, di mana suatu langkah hanya dapat dilakukan apabila langkah sebelumnya telah selesai atau syarat tertentu telah terpenuhi. Dengan demikian, keputusan pengendalian dilakukan secara berurutan sesuai urutan operasi yang telah dirancang (Pelatihan Engineer PT Sari Husada, 2026).

Dalam sistem otomasi industri, kendali sekuensial digunakan untuk mengoordinasikan berbagai komponen seperti sensor, aktuator, motor, silinder pneumatik, dan perangkat kontrol lainnya agar bekerja sesuai tahapan proses yang diinginkan. Berbeda dengan kendali logika yang mengambil keputusan berdasarkan kombinasi kondisi masukan secara bersamaan, kendali sekuensial berfokus pada urutan kejadian yang harus dilaksanakan secara sistematis (Bolton, 2021).

Penerapan kendali sekuensial banyak ditemukan pada sistem manufaktur otomatis, mesin pengemasan, konveyor, proses perakitan, serta berbagai aplikasi industri yang melibatkan serangkaian operasi berurutan. Penggunaan metode ini memungkinkan proses berjalan lebih teratur, aman, dan mudah dikendalikan.

11.1.2 Prinsip Kerja *Sequence Control*

Prinsip dasar *sequence control* adalah menjalankan suatu proses berdasarkan tahapan yang telah ditentukan sebelumnya. Setiap tahapan biasanya dikendalikan oleh sinyal masukan yang berasal dari sensor, tombol operasi, atau perangkat pendeteksi lainnya. Ketika suatu kondisi terpenuhi, sistem akan mengaktifkan langkah berikutnya hingga seluruh urutan proses selesai dilaksanakan.

Dalam modul kendali sekuensial dijelaskan bahwa keputusan gerakan pada kendali sekuensial dilakukan secara berurutan, berbeda dengan kendali logika yang mengambil keputusan secara simultan. Oleh karena itu, sistem kendali sekuensial sering direpresentasikan dalam bentuk diagram urutan (*sequence diagram*) yang menunjukkan hubungan antara masukan, proses, dan keluaran pada setiap tahap operasi.

Sebagai contoh, pada sistem elektropneumatik, silinder dapat diperintahkan untuk bergerak maju setelah tombol *Start* ditekan. Ketika silinder mencapai posisi maksimum dan terdeteksi oleh *limit switch*, sistem akan memberikan perintah berikutnya agar silinder bergerak kembali ke posisi awal. Seluruh proses berlangsung secara

berurutan sesuai logika yang telah ditentukan dalam program pengendalian.

Prinsip kerja tersebut memungkinkan sistem melakukan koordinasi antarperalatan secara lebih efektif sehingga setiap proses berlangsung sesuai tahapan yang telah direncanakan.

11.1.3 Komponen Utama dalam *Sequence Control*

Pelaksanaan kendali sekuensial melibatkan beberapa komponen utama yang saling berinteraksi untuk menghasilkan urutan operasi yang diinginkan. Komponen pertama adalah perangkat masukan (*input devices*) seperti tombol *Start*, tombol *Stop*, *limit switch*, sensor posisi, dan berbagai sensor proses lainnya. Komponen ini berfungsi memberikan informasi kondisi sistem kepada pengendali.

Komponen berikutnya adalah unit pengendali yang dapat berupa relay, PLC (*Programmable Logic Controller*), maupun sistem kontrol berbasis komputer. Pengendali bertugas memproses sinyal masukan dan menentukan urutan operasi yang harus dijalankan berdasarkan logika yang telah diprogram. Dalam aplikasi industri modern, pengendalian sekuensial umumnya direalisasikan menggunakan *ladder diagram* pada PLC karena lebih fleksibel dan mudah dimodifikasi dibandingkan sistem relay konvensional (Petruszella, 2020).

Komponen keluaran (*output devices*) terdiri atas aktuator seperti motor listrik, solenoid, katup pneumatik, silinder pneumatik, lampu indikator, dan berbagai perangkat lainnya yang melaksanakan perintah dari pengendali. Hubungan antara masukan, proses, dan

keluaran tersebut membentuk suatu urutan operasi yang dapat berjalan secara otomatis sesuai kebutuhan sistem.

Selain itu, rangkaian *latching* sering digunakan dalam sistem kendali sekuensial untuk mempertahankan kondisi keluaran tetap aktif meskipun sinyal pemicu awal sudah tidak diberikan. Fungsi ini membantu menjaga kesinambungan proses hingga tahapan berikutnya selesai dilaksanakan.

11.1.4 Penerapan *Sequence Control* dalam Industri

Kendali sekuensial banyak diterapkan dalam berbagai sistem otomasi industri yang membutuhkan operasi berurutan. Salah satu contohnya adalah proses *aligning* pada sistem elektropneumatik. Dalam aplikasi ini, tombol *Start* digunakan untuk memulai proses, kemudian silinder bergerak maju hingga mencapai posisi maksimum yang dideteksi oleh *limit switch*. Setelah posisi tersebut tercapai, sistem secara otomatis mengaktifkan langkah berikutnya sehingga silinder kembali ke posisi awal. Seluruh proses berlangsung dalam satu siklus operasi yang telah ditentukan sebelumnya.

Selain pada sistem pneumatik, kendali sekuensial juga digunakan pada mesin *bending*, sistem *palletizing*, proses *packing*, dan berbagai peralatan manufaktur otomatis lainnya. Pada aplikasi tersebut, setiap tahapan pekerjaan harus dilaksanakan secara berurutan agar produk yang dihasilkan memenuhi spesifikasi kualitas dan keselamatan operasi tetap terjaga.

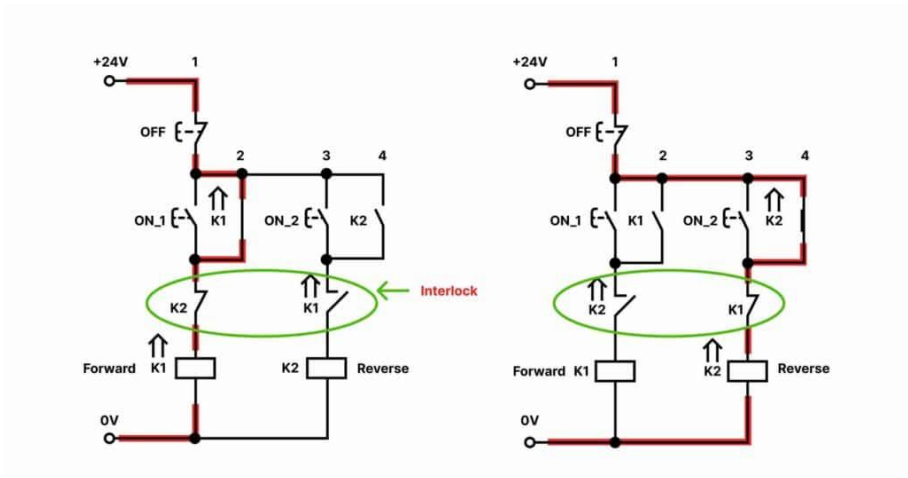
Dalam implementasi modern, sistem kendali sekuensial umumnya diprogram menggunakan PLC melalui perangkat lunak seperti TIA Portal. Penggunaan PLC memungkinkan modifikasi

urutan operasi dilakukan dengan lebih mudah serta meningkatkan fleksibilitas sistem terhadap perubahan kebutuhan produksi. Dengan kemampuan mengendalikan berbagai proses secara sistematis dan otomatis, *sequence control* menjadi salah satu metode pengendalian yang sangat penting dalam dunia industri modern.

11.2 Interlocking

11.2.1 Pengertian *Interlocking*

Interlocking merupakan metode pengamanan dalam sistem kontrol yang digunakan untuk mencegah dua atau lebih kondisi operasi yang saling bertentangan terjadi secara bersamaan. Dalam sistem kendali sekuensial, *interlocking* berfungsi memastikan bahwa suatu proses hanya dapat berjalan apabila kondisi tertentu telah terpenuhi. Konsep ini banyak diterapkan pada sistem otomasi industri untuk meningkatkan keselamatan operasi, melindungi peralatan, serta mencegah terjadinya kesalahan urutan kerja (*sequence error*) yang dapat mengganggu proses produksi (Bolton, 2021).



Gambar 11.1. Rangkaian pada Interlock Relay

Sumber: <https://share.google/dP5n03EBmtICE6lZy>

Pada sistem kontrol modern, *interlocking* dapat diterapkan melalui rangkaian listrik konvensional menggunakan relay maupun melalui pemrograman PLC. Penerapan *interlocking* memungkinkan sistem melakukan pembatasan otomatis terhadap perintah yang berpotensi menimbulkan konflik operasi. Dengan demikian, hanya kondisi yang sesuai dengan logika pengendalian yang diizinkan untuk dijalankan.

11.2.2 Prinsip Kerja *Interlocking*

Prinsip kerja *interlocking* didasarkan pada penggunaan kontak bantu (*auxiliary contact*), sensor, limit switch, atau logika pemrograman yang digunakan sebagai syarat pengoperasian suatu perangkat. Ketika suatu kondisi belum terpenuhi, rangkaian kontrol akan menghalangi aktuator atau peralatan tertentu untuk beroperasi.

Sebaliknya, apabila seluruh persyaratan telah dipenuhi, sistem akan mengizinkan proses berjalan sesuai urutan yang telah ditentukan.

Dalam sistem motor listrik, misalnya, *interlocking* digunakan untuk mencegah kontaktor putaran maju (*forward*) dan kontaktor putaran balik (*reverse*) aktif secara bersamaan. Apabila kedua kontaktor tersebut aktif pada waktu yang sama, dapat terjadi hubungan singkat yang berpotensi merusak peralatan. Oleh karena itu, kontak bantu dari masing-masing kontaktor digunakan sebagai pengunci sehingga hanya satu kontaktor yang dapat bekerja pada satu waktu (Petruszella, 2020).

Prinsip serupa juga diterapkan dalam sistem pneumatik dan hidrolik yang menggunakan beberapa aktuator. Setiap aktuator hanya dapat bergerak setelah menerima sinyal dari sensor atau limit switch yang menunjukkan bahwa langkah sebelumnya telah selesai dilaksanakan.

11.2.3 Jenis-Jenis *Interlocking*

Secara umum, *interlocking* dapat dibedakan menjadi *electrical interlocking* dan *mechanical interlocking*. *Electrical interlocking* menggunakan kontak bantu relay, kontaktor, sensor, atau logika PLC untuk mencegah terjadinya kondisi operasi yang tidak diinginkan. Jenis ini paling banyak digunakan karena mudah diterapkan dan dapat diintegrasikan dengan sistem otomasi berbasis PLC.

Sementara itu, *mechanical interlocking* menggunakan mekanisme fisik untuk mencegah dua perangkat bekerja secara bersamaan. Contohnya adalah pengunci mekanis yang dipasang

pada pasangan kontaktor *forward-reverse*. Apabila salah satu kontaktor aktif, mekanisme pengunci akan mencegah kontaktor lainnya bergerak sehingga kedua kontaktor tidak dapat aktif secara bersamaan.

Dalam banyak aplikasi industri, kedua jenis *interlocking* tersebut sering digunakan secara bersamaan untuk meningkatkan tingkat keamanan dan keandalan sistem. Kombinasi ini memberikan perlindungan berlapis terhadap kemungkinan kegagalan yang dapat terjadi akibat kesalahan logika maupun kerusakan komponen.

11.2.4 Penerapan *Interlocking* dalam Kendali Sekuensial

Pada sistem kendali sekuensial, *interlocking* memiliki peran penting dalam menjaga urutan operasi proses. Materi kendali sekuensial menjelaskan bahwa suatu proses industri bekerja berdasarkan urutan langkah yang saling berkaitan, di mana setiap keluaran (*output*) bergantung pada kondisi masukan (*input*) tertentu dan harus berlangsung secara berurutan.

Sebagai contoh, pada sistem elektropneumatik yang menggunakan silinder kerja ganda, pergerakan maju silinder hanya dapat dilakukan setelah tombol *start* ditekan dan sensor posisi awal mendeteksi bahwa silinder berada pada posisi minimum. Setelah silinder mencapai posisi maksimum, limit switch akan memberikan sinyal yang mengizinkan langkah berikutnya, yaitu pergerakan mundur silinder. Mekanisme tersebut merupakan bentuk *interlocking* yang memastikan setiap tahapan proses berjalan sesuai urutan yang telah dirancang.

Dalam sistem PLC, fungsi *interlocking* biasanya diwujudkan melalui penggunaan kontak logika, instruksi *interlock*, maupun kondisi pemrograman tertentu pada *ladder diagram*. Pendekatan ini memungkinkan pengendalian proses yang lebih fleksibel dan mudah dimodifikasi sesuai kebutuhan produksi.

11.2.5 Manfaat *Interlocking* dalam Sistem Industri

Penerapan *interlocking* memberikan berbagai manfaat dalam sistem otomasi industri. Salah satu manfaat utamanya adalah meningkatkan keselamatan kerja dengan mencegah pengoperasian peralatan pada kondisi yang berbahaya. Sistem ini juga membantu melindungi mesin dan komponen dari kerusakan akibat kesalahan operasi atau konflik perintah kendali.

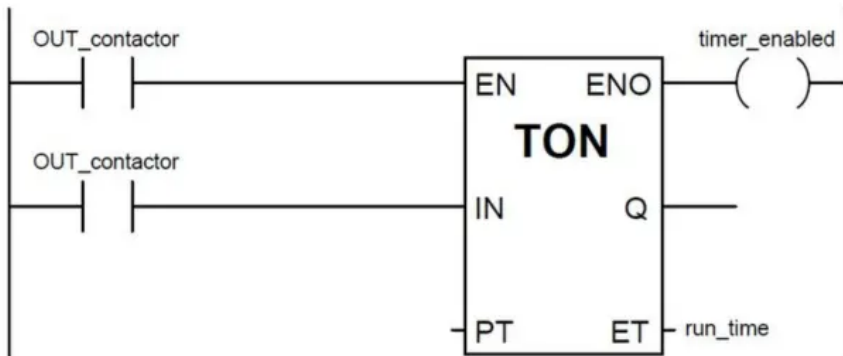
Selain itu, *interlocking* mampu meningkatkan keandalan proses karena setiap tahapan operasi hanya dapat berlangsung setelah kondisi sebelumnya dinyatakan selesai. Hal ini mengurangi kemungkinan terjadinya kesalahan urutan kerja yang dapat menyebabkan gangguan produksi. Dalam sistem manufaktur otomatis, keberadaan *interlocking* juga membantu menjaga kualitas produk karena proses berlangsung secara konsisten sesuai prosedur yang telah ditetapkan (Bolton, 2021).

Penggunaan *interlocking* yang dirancang dengan baik menjadi salah satu elemen penting dalam sistem kendali sekuensial modern. Oleh karena itu, pemahaman mengenai prinsip dan penerapannya merupakan kompetensi dasar yang harus dimiliki oleh teknisi maupun praktisi otomasi industri.

11.3 Timer

11.3.1 Pengertian *Timer* dalam Sistem Kontrol Sekuensial

Timer merupakan perangkat atau fungsi kontrol yang digunakan untuk memberikan jeda waktu tertentu dalam suatu proses otomasi sebelum suatu aksi dijalankan atau dihentikan. Dalam sistem kontrol sekuensial, *timer* berperan penting dalam mengatur urutan kerja mesin dan peralatan sehingga setiap tahapan proses berlangsung sesuai waktu yang telah ditentukan. Penggunaan *timer* memungkinkan sistem bekerja secara otomatis tanpa memerlukan intervensi operator pada setiap langkah proses.



Gambar 11.2. Timer PLC

Sumber: <https://share.google/TmCEK3yJVo4AnjfII>

Pada sistem kendali industri modern, *timer* dapat berupa komponen fisik seperti *time delay relay* maupun instruksi perangkat lunak yang terdapat pada PLC. Fungsi utama *timer* adalah menghasilkan penundaan (*delay*) antara sinyal masukan dan sinyal keluaran sehingga proses dapat berlangsung secara teratur dan aman.

Oleh karena itu, *timer* menjadi salah satu elemen dasar yang banyak digunakan dalam sistem otomasi, pengendalian mesin, serta proses manufaktur yang memerlukan pengaturan waktu secara presisi (Bolton, 2021).

Dalam kendali sekuensial, urutan operasi umumnya dilakukan secara bertahap berdasarkan kondisi tertentu. Selain memanfaatkan sensor dan sakelar, sistem sering menggunakan *timer* untuk menentukan kapan suatu langkah harus dimulai atau diakhiri. Dengan demikian, proses produksi dapat berlangsung secara konsisten sesuai desain yang telah ditetapkan.

11.3.2 Prinsip Kerja *Timer*

Prinsip kerja *timer* didasarkan pada pengukuran interval waktu sejak suatu sinyal masukan diterima. Ketika sinyal pemicu (*trigger*) diberikan, *timer* akan mulai menghitung waktu sesuai nilai yang telah diatur sebelumnya. Setelah waktu yang ditentukan tercapai, *timer* akan mengubah kondisi keluarannya sehingga dapat mengaktifkan atau menonaktifkan perangkat lain dalam sistem kontrol.

Pada sistem PLC, *timer* bekerja menggunakan basis waktu (*time base*) tertentu, misalnya milidetik atau detik. Ketika kondisi logika masukan bernilai aktif, pencacah waktu (*accumulated value*) akan bertambah hingga mencapai nilai yang telah ditentukan (*preset value*). Setelah nilai tersebut tercapai, keluaran *timer* akan berubah status sesuai dengan jenis *timer* yang digunakan.

Penggunaan *timer* sangat membantu dalam mengendalikan proses yang memerlukan urutan kerja berdasarkan waktu. Dalam

sistem kendali sekuensial, pengaturan urutan proses biasanya dilakukan melalui kombinasi logika, sensor, dan rangkaian kontrol yang disusun secara berurutan menggunakan *ladder diagram*. Materi pelatihan kendali sekuensial menjelaskan bahwa proses otomasi industri umumnya dibangun melalui identifikasi input dan output, penyusunan diagram sekuensial, serta implementasi pada rangkaian kontrol listrik atau PLC sehingga setiap langkah dapat berlangsung sesuai urutan yang direncanakan.

11.3.3 Jenis-Jenis *Timer*

Dalam sistem kontrol industri, terdapat beberapa jenis *timer* yang umum digunakan. Salah satu jenis yang paling banyak diterapkan adalah *On Delay Timer* (TON). *Timer* ini memberikan penundaan waktu sebelum keluaran aktif setelah menerima sinyal masukan. Sebagai contoh, ketika tombol *start* ditekan, motor tidak langsung beroperasi tetapi menunggu beberapa detik sesuai waktu yang telah diatur.

Jenis berikutnya adalah *Off Delay Timer* (TOF), yaitu *timer* yang mempertahankan keluaran tetap aktif selama periode tertentu setelah sinyal masukan dinonaktifkan. Jenis ini banyak digunakan pada sistem ventilasi, pendingin, dan proses yang memerlukan waktu tambahan sebelum peralatan benar-benar berhenti bekerja.

Selain itu, terdapat *Retentive Timer* yang mampu menyimpan nilai waktu yang telah dihitung meskipun sinyal masukan berubah menjadi tidak aktif. Nilai waktu tersebut akan tetap tersimpan hingga dilakukan proses *reset*. Karakteristik ini sangat berguna pada aplikasi yang memerlukan akumulasi waktu operasi secara bertahap.

Berbagai jenis *timer* tersebut dapat dipilih sesuai kebutuhan proses dan karakteristik sistem yang akan dikendalikan.

11.3.4 Penerapan *Timer* dalam Sistem Otomasi Industri

Penerapan *timer* dapat ditemukan pada berbagai sistem otomasi industri. Pada sistem konveyor, *timer* digunakan untuk mengatur jeda perpindahan produk dari satu stasiun kerja ke stasiun berikutnya. Dalam proses pengemasan, *timer* dapat digunakan untuk mengendalikan durasi penyegelan kemasan agar kualitas produk tetap terjaga.

Pada sistem pneumatik dan elektropneumatik, *timer* sering digunakan untuk mengatur urutan gerakan silinder sehingga proses berlangsung sesuai tahapan yang telah ditentukan. Misalnya, sebuah silinder dapat diperintahkan untuk menunggu beberapa detik setelah mencapai posisi tertentu sebelum melakukan gerakan berikutnya. Pengaturan waktu tersebut membantu menghindari benturan mekanis dan meningkatkan keamanan operasi.

Selain itu, *timer* juga banyak digunakan dalam sistem pencahayaan otomatis, pengendalian motor listrik, pengoperasian pompa, serta berbagai aplikasi manufaktur berbasis PLC. Kemampuan *timer* dalam mengatur urutan kerja berdasarkan waktu menjadikannya komponen yang sangat penting dalam sistem kontrol sekuensial modern. Dengan pengaturan yang tepat, *timer* mampu meningkatkan efisiensi proses, menjaga konsistensi operasi, serta mendukung keandalan sistem otomasi industri secara keseluruhan.

11.4 Counter

11.4.1 Pengertian Counter

Counter merupakan fungsi dalam sistem kontrol yang digunakan untuk menghitung jumlah kejadian atau pulsa yang diterima dari perangkat masukan. Dalam sistem otomasi industri, *counter* banyak digunakan pada *Programmable Logic Controller* (PLC) untuk melakukan pencacahan terhadap objek, produk, siklus kerja mesin, maupun sinyal yang dihasilkan oleh sensor. Fungsi ini memungkinkan sistem mengingat jumlah kejadian yang telah terjadi dan mengambil tindakan tertentu setelah nilai hitungan mencapai batas yang telah ditentukan.

Pada sistem kontrol sekuensial, *counter* berperan dalam mengatur urutan operasi berdasarkan jumlah kejadian, bukan berdasarkan waktu. Sebagai contoh, suatu sistem pengemasan dapat diatur untuk menghentikan konveyor setelah sejumlah produk tertentu berhasil diproses. Dengan memanfaatkan *counter*, proses tersebut dapat dilakukan secara otomatis tanpa memerlukan perhitungan manual oleh operator. Menurut Hughes (2021), fungsi pencacahan merupakan salah satu fitur dasar PLC yang memungkinkan sistem kontrol mengelola operasi berulang secara lebih efisien dan konsisten.

Selain digunakan untuk menghitung jumlah objek, *counter* juga dapat dimanfaatkan untuk memantau frekuensi operasi suatu peralatan. Informasi tersebut sering digunakan dalam kegiatan pemeliharaan (*maintenance*) untuk menentukan jadwal inspeksi atau

penggantian komponen berdasarkan jumlah siklus kerja yang telah dicapai.

11.4.2 Prinsip Kerja Counter

Prinsip kerja *counter* didasarkan pada penerimaan sinyal pulsa dari perangkat input seperti *push button*, sensor fotoelektrik, *proximity sensor*, atau *limit switch*. Setiap pulsa yang diterima akan menambah atau mengurangi nilai hitungan yang tersimpan dalam memori pengendali. Nilai tersebut akan terus diperbarui selama sistem beroperasi hingga mencapai nilai target yang telah ditentukan sebelumnya.

Dalam aplikasi PLC, terdapat beberapa jenis *counter*, yaitu *up counter*, *down counter*, dan *up-down counter*. *Up counter* digunakan untuk menghitung kenaikan jumlah pulsa mulai dari nol hingga mencapai nilai tertentu. Sebaliknya, *down counter* menghitung mundur dari nilai awal menuju nol. Sementara itu, *up-down counter* mampu melakukan penambahan dan pengurangan nilai hitungan sesuai kondisi masukan yang diterima oleh sistem.

Ketika nilai hitungan mencapai nilai yang telah ditentukan (*preset value*), *counter* akan menghasilkan sinyal keluaran yang dapat digunakan untuk mengaktifkan aktuator, memindahkan proses ke tahapan berikutnya, atau menghentikan operasi tertentu. Kemampuan tersebut menjadikan *counter* sebagai salah satu instruksi penting dalam pemrograman PLC karena dapat digunakan untuk membangun logika kontrol yang lebih fleksibel dan terstruktur (Webb & Reis, 2022).

11.4.3 Penerapan Counter dalam Sistem Industri

Penggunaan *counter* banyak ditemukan pada berbagai aplikasi industri yang memerlukan proses pencacahan secara otomatis. Salah satu contoh yang paling umum adalah sistem penghitung produk pada jalur konveyor. Sensor yang dipasang di sepanjang jalur produksi akan menghasilkan pulsa setiap kali produk melewati titik deteksi. Pulsa tersebut kemudian dihitung oleh *counter* hingga mencapai jumlah tertentu yang telah ditetapkan dalam program kontrol.

Pada industri pengemasan, *counter* digunakan untuk memastikan jumlah produk dalam satu kemasan sesuai dengan spesifikasi produksi. Setelah jumlah yang ditentukan tercapai, sistem secara otomatis mengaktifkan mekanisme penutupan kemasan atau memindahkan produk ke tahap proses berikutnya. Penggunaan *counter* dalam aplikasi ini membantu meningkatkan akurasi dan mengurangi kemungkinan kesalahan yang dapat terjadi apabila proses dilakukan secara manual.

Selain itu, *counter* juga digunakan pada sistem pemantauan siklus kerja mesin. Jumlah operasi yang dilakukan oleh aktuator, motor, atau silinder pneumatik dapat dihitung dan disimpan sebagai data operasional. Informasi tersebut dapat dimanfaatkan untuk mendukung program pemeliharaan preventif sehingga keandalan peralatan dapat dipertahankan. Dengan kemampuannya dalam menghitung dan mengelola jumlah kejadian secara otomatis, *counter* menjadi salah satu elemen penting dalam sistem kontrol sekuensial yang banyak diterapkan pada industri manufaktur modern.

Bab 12: PLC dan Relay Logic

Dr. Eng. Ir. Petrus Sutiyasadi

12.1 Dasar PLC

12.1.1 Pengertian PLC

Programmable Logic Controller (PLC) merupakan perangkat kontrol digital yang dirancang untuk mengendalikan berbagai proses otomasi industri melalui program yang dapat disusun, dimodifikasi, dan dijalankan sesuai kebutuhan aplikasi. PLC dikembangkan sebagai pengganti sistem kontrol berbasis relay konvensional yang memiliki keterbatasan dalam hal fleksibilitas, kebutuhan ruang, serta kemudahan modifikasi rangkaian. Dengan menggunakan PLC, proses pengendalian dapat dilakukan secara lebih efisien karena logika kontrol disimpan dalam bentuk program, bukan rangkaian kabel yang kompleks (Petruzella, 2020).



Gambar 12.1. Programmable Logic Controller (PLC)

Sumber: <https://share.google/nCJhNTCoitFFcsGYZ>

Dalam sistem otomasi, PLC berfungsi sebagai pusat pengendalian yang menerima sinyal dari berbagai perangkat masukan (*input devices*), memproses informasi berdasarkan program yang telah dibuat, kemudian menghasilkan sinyal keluaran (*output*) untuk mengendalikan aktuator atau peralatan lapangan. Kemampuan tersebut menjadikan PLC sebagai salah satu komponen utama dalam sistem manufaktur modern, proses produksi otomatis, serta berbagai aplikasi pengendalian industri.

Perkembangan teknologi PLC memungkinkan integrasi dengan berbagai sistem komunikasi industri, *Human Machine Interface* (HMI), sensor cerdas, dan sistem pengawasan berbasis komputer. Oleh karena itu, PLC menjadi solusi yang banyak digunakan untuk meningkatkan produktivitas, keandalan, dan fleksibilitas sistem kontrol industri.

12.1.2 Prinsip Kerja PLC

Prinsip kerja PLC dimulai dari proses pembacaan sinyal masukan yang berasal dari sensor, tombol operasi, *limit switch*, maupun perangkat lapangan lainnya. Setelah seluruh data masukan diterima, PLC akan menjalankan program yang tersimpan di dalam memori untuk menentukan tindakan pengendalian yang harus dilakukan. Hasil pemrosesan tersebut kemudian dikirimkan ke perangkat keluaran seperti motor, solenoid, lampu indikator, dan aktuator lainnya (Bolton, 2021).

Proses kerja PLC berlangsung secara berulang dalam suatu siklus yang dikenal sebagai *scan cycle*. Pada setiap siklus, PLC

melakukan pembacaan masukan, mengeksekusi program, memperbarui kondisi keluaran, dan mengulangi proses tersebut secara terus-menerus. Kecepatan siklus ini memungkinkan PLC merespons perubahan kondisi sistem dalam waktu yang sangat singkat sehingga proses pengendalian dapat berlangsung secara real-time.

Dalam aplikasi kendali sekuensial, PLC banyak digunakan untuk mengimplementasikan *ladder diagram* sebagai metode pemrograman utama. Pengendalian sistem secara elektrik maupun berbasis program umumnya direpresentasikan dalam bentuk *ladder diagram* yang menyerupai rangkaian relay konvensional sehingga mudah dipahami oleh teknisi dan operator industri (Pelatihan Engineer PT Sari Husada, 2026).

12.1.3 Komponen Utama PLC

PLC terdiri atas beberapa komponen utama yang bekerja secara terintegrasi untuk menjalankan fungsi pengendalian. Komponen pertama adalah *Central Processing Unit* (CPU) yang berfungsi sebagai pusat pemrosesan data dan eksekusi program. CPU menerima informasi dari modul masukan, menjalankan instruksi program, kemudian menghasilkan keputusan yang akan diteruskan ke modul keluaran.

Komponen berikutnya adalah modul masukan (*input module*). Modul ini berfungsi menerima sinyal dari berbagai perangkat lapangan seperti sensor, tombol tekan, sakelar, dan *limit switch*. Sinyal yang diterima dapat berupa sinyal digital maupun analog tergantung pada jenis perangkat yang digunakan.

Modul keluaran (*output module*) berfungsi mengirimkan sinyal kendali kepada aktuator seperti motor, kontaktor, relay, lampu indikator, dan katup solenoid. Selain itu, PLC juga dilengkapi dengan memori untuk menyimpan program dan data operasional yang diperlukan selama proses pengendalian berlangsung (Petruzella, 2020).

Komponen lain yang tidak kalah penting adalah perangkat pemrograman yang digunakan untuk membuat, mengedit, dan mengunggah program ke dalam PLC. Pada sistem modern, pemrograman PLC dilakukan menggunakan perangkat lunak khusus seperti TIA Portal untuk PLC Siemens. Modul pelatihan kendali sekuensial menunjukkan bahwa simulasi pemrograman PLC Siemens dapat dilakukan menggunakan TIA Portal sebagai sarana pengembangan dan pengujian program kontrol industri.

12.1.4 Penerapan PLC dalam Sistem Otomasi

PLC digunakan secara luas dalam berbagai bidang industri karena mampu mengendalikan proses secara otomatis dan fleksibel. Pada sistem manufaktur, PLC digunakan untuk mengendalikan konveyor, mesin pengemasan, sistem *palletizing*, mesin *bending*, dan berbagai peralatan produksi lainnya. Kemampuan PLC dalam mengelola urutan operasi menjadikannya sangat cocok untuk aplikasi kendali logika maupun kendali sekuensial (Bolton, 2021).

Dalam sistem elektropneumatik, PLC dapat digunakan untuk mengendalikan gerakan silinder berdasarkan sinyal dari tombol operasi dan *limit switch*. Sebagai contoh, suatu silinder dapat diperintahkan bergerak maju hingga mencapai posisi maksimum,

kemudian bergerak kembali ke posisi awal berdasarkan urutan operasi yang telah diprogram. Implementasi tersebut dilakukan menggunakan *ladder diagram* yang memproses masukan dan menghasilkan keluaran sesuai logika pengendalian yang diinginkan.

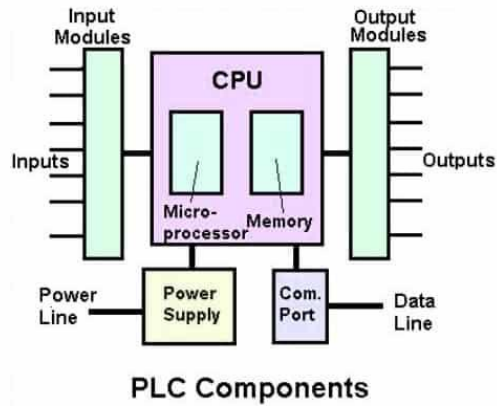
Selain itu, PLC juga digunakan pada sistem pengolahan air, pembangkit tenaga listrik, industri makanan dan minuman, serta berbagai fasilitas produksi modern yang membutuhkan tingkat otomatisasi tinggi. Fleksibilitas pemrograman, kemudahan pemeliharaan, serta kemampuan integrasi dengan berbagai perangkat industri menjadikan PLC sebagai salah satu teknologi kontrol yang paling penting dalam perkembangan sistem otomasi modern.

12.2 Struktur PLC

12.2.1 Pengertian Struktur PLC

Programmable Logic Controller (PLC) merupakan perangkat kontrol digital yang dirancang untuk mengendalikan proses industri secara otomatis melalui pemrograman. PLC digunakan sebagai pengganti sistem kontrol berbasis relay konvensional karena memiliki fleksibilitas, keandalan, dan kemudahan modifikasi yang lebih tinggi. Dalam sistem otomasi modern, PLC berfungsi menerima sinyal dari berbagai perangkat masukan (*input*), mengolah data berdasarkan program yang tersimpan di dalam memori, kemudian menghasilkan sinyal keluaran

(*output*) untuk mengendalikan aktuator atau peralatan lapangan (Bolton, 2021).



Gambar 12.2. Struktur PLC

Sumber: <https://share.google/ZmR4cqskLkqnVLZDI>

Struktur PLC terdiri atas beberapa bagian utama yang saling terintegrasi untuk menjalankan fungsi pengendalian. Setiap bagian memiliki tugas tertentu dalam proses penerimaan data, pengolahan logika, serta pengiriman perintah ke perangkat keluaran. Kemampuan PLC dalam menjalankan fungsi logika dan kendali sekuensial menjadikannya sebagai perangkat yang banyak digunakan pada sistem otomasi industri. Pengendalian sistem secara elektrik maupun berbasis program umumnya diwujudkan dalam bentuk *ladder diagram* yang dieksekusi oleh PLC.

12.2.2 Unit Catu Daya (*Power Supply Unit*)

Power Supply Unit (PSU) merupakan bagian PLC yang berfungsi menyediakan sumber daya listrik bagi seluruh komponen internal PLC. Unit ini mengubah tegangan listrik dari sumber eksternal menjadi tegangan yang sesuai untuk kebutuhan rangkaian elektronik di dalam PLC. Umumnya PLC menggunakan tegangan DC internal yang diperoleh dari konversi sumber AC atau DC eksternal.

Keandalan catu daya sangat memengaruhi kinerja PLC karena seluruh proses pengolahan data bergantung pada kestabilan tegangan yang diberikan. Gangguan pada sistem catu daya dapat menyebabkan PLC berhenti beroperasi atau menghasilkan kesalahan dalam proses pengendalian. Oleh karena itu, banyak sistem industri menggunakan *uninterruptible power supply* (UPS) untuk menjaga kontinuitas operasi PLC ketika terjadi gangguan pasokan listrik.

Selain menyediakan daya bagi prosesor dan memori, unit catu daya juga mendukung modul input-output serta perangkat komunikasi yang terhubung dengan PLC. Dengan demikian, kestabilan sumber daya menjadi salah satu faktor penting dalam menjaga keandalan sistem otomasi industri.

12.2.3 Unit Pemroses Pusat (*Central Processing Unit*)

Central Processing Unit (CPU) merupakan komponen utama PLC yang berfungsi sebagai pusat pengendalian dan pengolahan data. CPU bertugas membaca sinyal dari modul input, menjalankan program yang tersimpan dalam memori, melakukan perhitungan logika, dan mengirimkan hasil pengolahan ke modul output. Seluruh

operasi PLC dikendalikan oleh CPU melalui siklus kerja yang berlangsung secara berulang dan kontinu (Petruszella, 2020).

Proses kerja CPU diawali dengan membaca status seluruh input yang terhubung ke PLC. Setelah itu, CPU mengeksekusi instruksi program sesuai urutan yang telah ditetapkan. Hasil eksekusi kemudian digunakan untuk memperbarui kondisi output yang mengendalikan berbagai aktuator di lapangan. Siklus ini berlangsung dalam waktu yang sangat singkat sehingga sistem mampu merespons perubahan kondisi proses secara cepat.

Kemampuan CPU ditentukan oleh spesifikasi perangkat, seperti kecepatan pemrosesan, kapasitas memori, jumlah instruksi yang dapat dijalankan, dan kemampuan komunikasi dengan perangkat lain. Semakin tinggi kemampuan CPU, semakin kompleks pula aplikasi yang dapat dikendalikan oleh PLC.

12.2.4 Modul Input dan Output

Modul input dan output (*I/O Module*) merupakan bagian PLC yang berfungsi sebagai antarmuka antara PLC dan perangkat lapangan. Modul input menerima sinyal dari sensor, tombol tekan (*push button*), *limit switch*, dan perangkat masukan lainnya. Sinyal tersebut kemudian diterjemahkan ke dalam format yang dapat diproses oleh CPU.

Sebaliknya, modul output berfungsi mengirimkan sinyal dari CPU ke aktuator seperti kontaktor, relay, lampu indikator, motor listrik, dan katup solenoid. Dalam sistem kendali sekuensial, hubungan antara input dan output menjadi dasar pembentukan urutan kerja proses. Sebelum membuat program PLC, identifikasi

perangkat input dan output merupakan langkah penting dalam perancangan sistem kendali.

Modul I/O dapat berupa sinyal digital maupun analog. Modul digital digunakan untuk membaca kondisi ON/OFF, sedangkan modul analog digunakan untuk menangani sinyal yang berubah secara kontinu, seperti suhu, tekanan, level, dan laju aliran.

12.2.5 Memori dan Sistem Pemrograman PLC

Memori PLC berfungsi menyimpan program, data proses, parameter sistem, dan informasi lainnya yang diperlukan selama operasi. Program yang tersimpan di dalam memori akan dieksekusi secara berulang oleh CPU untuk mengendalikan proses industri. Jenis memori yang umum digunakan pada PLC meliputi RAM, ROM, dan memori non-volatil yang mampu mempertahankan data meskipun catu daya dimatikan.

Pemrograman PLC umumnya dilakukan menggunakan *ladder diagram*, yaitu bahasa pemrograman grafis yang menyerupai rangkaian relay konvensional. Bahasa ini banyak digunakan karena mudah dipahami oleh teknisi yang memiliki latar belakang kelistrikan dan kontrol industri. Selain *ladder diagram*, PLC modern juga mendukung bahasa pemrograman lain seperti *Function Block Diagram* (FBD), *Structured Text* (ST), dan *Sequential Function Chart* (SFC) (Bolton, 2021).

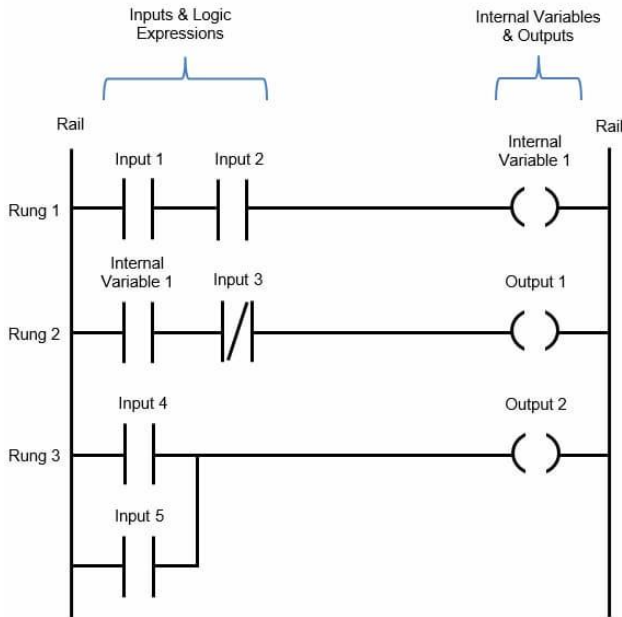
Perkembangan teknologi industri juga memungkinkan pemrograman dan simulasi PLC dilakukan menggunakan perangkat lunak khusus. Salah satu contoh yang banyak digunakan adalah TIA Portal untuk PLC Siemens, yang memungkinkan proses

perancangan, simulasi, dan pengujian program dilakukan secara terintegrasi sebelum diterapkan pada sistem nyata.

12.3 Ladder Diagram

12.3.1 Pengertian *Ladder Diagram*

Ladder diagram merupakan metode pemrograman dan representasi rangkaian kontrol yang paling banyak digunakan dalam sistem PLC (*Programmable Logic Controller*) maupun sistem kontrol berbasis relay. Diagram ini disebut *ladder diagram* karena bentuknya menyerupai tangga, yang terdiri atas dua garis vertikal sebagai sumber daya dan sejumlah garis horizontal yang menggambarkan rangkaian logika kontrol. Setiap garis horizontal atau *rung* merepresentasikan suatu fungsi atau urutan operasi tertentu dalam sistem kendali.



Gambar 12.3. Ladder Diagram

Sumber: <https://share.google/v0PMmrwSewzXKdykc>

Pada awal perkembangannya, *ladder diagram* digunakan untuk menggambarkan rangkaian relay elektromekanis. Seiring berkembangnya teknologi otomasi, konsep tersebut diadopsi ke dalam PLC karena dianggap mudah dipahami oleh teknisi dan insinyur yang telah terbiasa dengan sistem relay konvensional. Oleh karena itu, *ladder diagram* menjadi salah satu bahasa pemrograman standar yang digunakan dalam pengendalian mesin, proses manufaktur, dan sistem otomasi industri (Bolton, 2021).

Dalam sistem kontrol modern, *ladder diagram* berfungsi sebagai sarana untuk menerjemahkan logika operasi suatu proses ke dalam bentuk yang mudah dibaca dan diprogram. Dengan menggunakan diagram ini, hubungan antara sensor, sakelar, relay,

timer, counter, dan aktuator dapat divisualisasikan secara sistematis sehingga memudahkan proses perancangan, pemeliharaan, dan *troubleshooting*.

12.3.2 Struktur Dasar *Ladder Diagram*

Struktur dasar *ladder diagram* terdiri atas dua rel vertikal yang mewakili sumber tegangan dan sejumlah *rung* yang menghubungkan kedua rel tersebut. Pada setiap *rung* terdapat simbol-simbol yang merepresentasikan perangkat masukan (*input*) dan keluaran (*output*). Simbol kontak digunakan untuk menggambarkan kondisi sakelar, sensor, atau relay, sedangkan simbol koil (*coil*) digunakan untuk menunjukkan perangkat keluaran seperti relay, kontaktor, lampu indikator, maupun aktuator lainnya.

Logika kerja pada *ladder diagram* mengikuti prinsip aliran daya dari sisi kiri menuju sisi kanan. Ketika kondisi logika pada kontak terpenuhi, maka arus logika dianggap mengalir menuju koil sehingga keluaran akan aktif. Sebaliknya, apabila salah satu kondisi tidak terpenuhi, keluaran akan tetap tidak aktif. Konsep ini membuat *ladder diagram* mudah dipahami karena memiliki kemiripan dengan rangkaian kontrol listrik konvensional.

Dalam pelatihan kendali sekuensial dijelaskan bahwa pengendalian sistem otomasi secara elektrik maupun berbasis program umumnya direpresentasikan menggunakan *ladder diagram*. Diagram ini digunakan untuk menggabungkan fungsi kendali logika dan kendali sekuensial sehingga proses otomasi dapat berlangsung sesuai urutan operasi yang telah dirancang.

12.3.3 Fungsi *Ladder Diagram* dalam Sistem PLC dan Relay Logic

Ladder diagram memiliki peran yang sangat penting dalam sistem PLC dan *relay logic* karena berfungsi sebagai media untuk menyusun logika pengendalian suatu proses. Dengan menggunakan diagram ini, berbagai kondisi operasi dapat diterjemahkan menjadi instruksi yang mudah dipahami dan dijalankan oleh sistem kontrol. Logika dasar seperti AND, OR, NOT, serta kombinasi berbagai kondisi dapat direpresentasikan secara visual sehingga memudahkan proses pemrograman dan analisis sistem.

Dalam sistem PLC, *ladder diagram* digunakan untuk mengendalikan berbagai perangkat industri seperti motor listrik, konveyor, pompa, katup, silinder pneumatik, dan robot industri. Selain itu, diagram ini juga dapat digunakan untuk mengimplementasikan fungsi yang lebih kompleks seperti *interlocking*, *latching*, *timer*, *counter*, dan pengendalian sekuensial. Kemampuan tersebut menjadikan *ladder diagram* sebagai salah satu metode pemrograman yang paling fleksibel dalam dunia otomasi industri.

Keunggulan lainnya adalah kemudahan dalam proses pemeliharaan. Ketika terjadi gangguan pada sistem, teknisi dapat menelusuri logika operasi secara langsung melalui *ladder diagram* sehingga sumber masalah dapat diidentifikasi dengan lebih cepat. Hal ini sangat penting dalam lingkungan industri yang membutuhkan waktu henti (*downtime*) seminimal mungkin.

12.3.4 Penerapan *Ladder Diagram* pada Sistem Kendali Sekuensial

Dalam sistem kendali sekuensial, *ladder diagram* digunakan untuk mengatur urutan operasi suatu proses berdasarkan kondisi tertentu yang berasal dari sensor, tombol, maupun perangkat masukan lainnya. Setiap tahapan proses direpresentasikan dalam bentuk logika yang saling berhubungan sehingga sistem dapat menjalankan operasi secara berurutan sesuai kebutuhan.

Pada aplikasi elektropneumatik, misalnya, *ladder diagram* digunakan untuk mengendalikan gerakan maju dan mundur silinder berdasarkan sinyal dari *limit switch* dan tombol operasi. Materi pelatihan kendali sekuensial menunjukkan bahwa proses perancangan sistem dimulai dari identifikasi *input* dan *output*, penyusunan diagram sekuensial, kemudian diterjemahkan ke dalam rangkaian elektrik berbasis *ladder diagram* untuk menghasilkan urutan kerja yang sesuai dengan kebutuhan proses.

Selain digunakan pada sistem pneumatik, *ladder diagram* juga diterapkan pada mesin pengemasan, sistem konveyor otomatis, mesin *bending*, sistem pengisian cairan, dan berbagai proses manufaktur lainnya. Kemampuannya dalam mengintegrasikan fungsi logika, pengaturan waktu, dan pengendalian sekuensial menjadikan *ladder diagram* sebagai dasar utama dalam pemrograman PLC serta implementasi sistem otomasi industri modern.

12.4 Relay Logic

12.4.1 Pengertian Relay Logic

Relay logic merupakan metode pengendalian yang menggunakan relay elektromagnetik sebagai elemen utama untuk membentuk fungsi logika dan urutan kerja suatu sistem kontrol. Sebelum berkembangnya teknologi *Programmable Logic Controller* (PLC), *relay logic* menjadi metode yang paling banyak digunakan dalam sistem otomasi industri untuk mengendalikan motor, lampu indikator, katup solenoid, dan berbagai peralatan listrik lainnya. Sistem ini bekerja berdasarkan hubungan kontak *Normally Open* (NO) dan *Normally Closed* (NC) yang dioperasikan oleh kumparan relay sehingga mampu menghasilkan fungsi logika seperti AND, OR, dan NOT.

Dalam penerapannya, *relay logic* memungkinkan suatu proses dikendalikan secara otomatis berdasarkan kondisi masukan yang diterima. Ketika kumparan relay diberi energi listrik, kontak-kontak relay akan berubah posisi sehingga menghasilkan aksi tertentu pada rangkaian kontrol maupun rangkaian daya. Kemampuan tersebut menjadikan *relay logic* sebagai dasar pengembangan sistem kontrol modern karena konsep logika yang digunakan masih diterapkan dalam pemrograman PLC melalui *ladder diagram* (Petruszella, 2020).

Pada sistem industri, *relay logic* banyak digunakan untuk mengendalikan proses yang memerlukan urutan operasi tertentu, seperti sistem *start-stop* motor, pengendalian konveyor, sistem

pengemasan, dan pengoperasian aktuator pneumatik. Oleh karena itu, pemahaman mengenai prinsip kerja *relay logic* menjadi dasar penting dalam mempelajari sistem otomasi dan pengendalian industri.

12.4.2 Prinsip Kerja Relay Logic

Prinsip kerja *relay logic* didasarkan pada perubahan kondisi kontak akibat adanya energi listrik yang mengalir pada kumparan relay. Ketika kumparan diaktifkan, medan magnet yang terbentuk akan menarik kontak sehingga posisi kontak berubah dari kondisi normalnya. Perubahan tersebut dapat digunakan untuk menghubungkan atau memutus aliran listrik pada bagian lain dari rangkaian kontrol.

Dalam sistem kontrol, beberapa relay dapat dirangkai untuk membentuk fungsi logika tertentu. Sebagai contoh, dua kontak NO yang dipasang secara seri akan menghasilkan fungsi logika AND karena keluaran hanya aktif apabila kedua kontak tertutup secara bersamaan. Sebaliknya, dua kontak NO yang dipasang secara paralel akan menghasilkan fungsi logika OR karena keluaran dapat aktif apabila salah satu kontak tertutup. Konsep ini menjadi dasar pembentukan berbagai strategi pengendalian pada sistem otomasi industri (Bolton, 2021).

Selain fungsi logika dasar, *relay logic* juga digunakan untuk membangun rangkaian pengunci (*latching circuit*). Pada rangkaian ini, kontak bantu relay digunakan untuk mempertahankan kondisi keluaran tetap aktif meskipun sinyal awal sudah hilang. Teknik *latching* banyak diterapkan pada sistem *start-stop* motor dan

berbagai aplikasi kontrol lainnya karena mampu menjaga kondisi operasi tanpa harus menahan tombol kendali secara terus-menerus.

12.4.3 Penerapan Relay Logic pada Sistem Kontrol Industri

Penerapan *relay logic* dapat ditemukan pada berbagai sistem kontrol industri yang memerlukan pengoperasian secara berurutan maupun berdasarkan kondisi logika tertentu. Salah satu aplikasi yang paling umum adalah pengendalian motor listrik menggunakan tombol *start* dan *stop*. Dalam sistem tersebut, relay digunakan untuk mengendalikan kontaktor sehingga motor dapat dihidupkan atau dihentikan sesuai perintah operator.

Selain digunakan pada sistem motor, *relay logic* juga banyak diterapkan pada sistem kontrol sekuensial yang melibatkan sensor, *limit switch*, dan aktuator. Dalam proses otomasi pneumatik, misalnya, relay dapat digunakan untuk mengatur urutan gerakan silinder berdasarkan sinyal yang diterima dari *limit switch*. Sistem akan berpindah dari satu langkah ke langkah berikutnya sesuai urutan yang telah dirancang dalam diagram kontrol. Konsep pengendalian berurutan ini merupakan karakteristik utama sistem kontrol sekuensial yang banyak digunakan dalam aplikasi manufaktur dan otomasi industri (Hughes, 2021).

Meskipun saat ini sebagian besar sistem kontrol telah menggunakan PLC, prinsip *relay logic* tetap dipertahankan melalui penggunaan *ladder diagram* yang memiliki simbol dan cara kerja serupa dengan rangkaian relay konvensional. Oleh karena itu, pemahaman terhadap *relay logic* menjadi kompetensi dasar yang harus dimiliki oleh teknisi dan insinyur otomasi karena konsep

tersebut masih menjadi fondasi dalam perancangan, pengoperasian, dan pemeliharaan sistem kontrol modern.

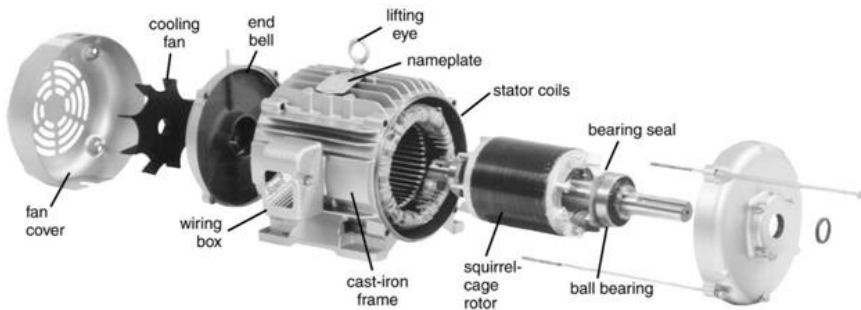
Bab 13: Motor dan Aktuator Industri

Ir. Eko Aris Budi Cahyono, M.Eng.

13.1 Motor Induksi

13.1.1 Pengertian Motor Induksi

Motor induksi merupakan jenis motor listrik arus bolak-balik (*Alternating Current* atau AC) yang bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Motor ini mengubah energi listrik menjadi energi mekanik tanpa memerlukan hubungan listrik langsung pada bagian rotor. Arus listrik pada rotor dihasilkan melalui proses induksi akibat adanya medan magnet berputar yang dibangkitkan oleh stator. Karena konstruksinya yang sederhana dan tidak menggunakan komutator maupun sikat (*brush*), motor induksi memiliki tingkat keandalan yang tinggi serta kebutuhan perawatan yang relatif rendah dibandingkan jenis motor listrik lainnya.



Gambar 13.1. Motor induksi

Sumber: <https://share.google/mmv1OEcr7wDYS12VH>

Dalam dunia industri, motor induksi menjadi penggerak utama berbagai peralatan produksi karena mampu beroperasi secara kontinu dengan efisiensi yang baik. Penggunaan motor induksi dapat ditemukan pada sistem pompa, kipas, kompresor, konveyor, mesin pengolahan, dan berbagai aplikasi otomasi industri lainnya. Kemampuannya dalam menghasilkan tenaga yang stabil menjadikan motor induksi sebagai salah satu aktuator yang paling banyak digunakan dalam sistem industri modern.

13.1.2 Prinsip Kerja Motor Induksi

Prinsip kerja motor induksi didasarkan pada hukum induksi elektromagnetik yang dikemukakan oleh Faraday. Ketika kumparan stator dialiri arus AC tiga fasa, akan terbentuk medan magnet berputar (*rotating magnetic field*) yang bergerak mengelilingi stator. Medan magnet tersebut memotong konduktor pada rotor sehingga menimbulkan gaya gerak listrik (GGL) induksi. Akibat adanya GGL tersebut, arus listrik mengalir pada rotor dan menghasilkan medan magnet yang berinteraksi dengan medan magnet stator sehingga rotor mulai berputar (Hughes & Drury, 2019).

Kecepatan medan magnet stator disebut kecepatan sinkron (*synchronous speed*), yang nilainya bergantung pada frekuensi sumber listrik dan jumlah kutub motor. Hubungan tersebut dapat dinyatakan melalui persamaan berikut:

$$N_s = \frac{120f}{P}$$

Pada saat beroperasi, rotor selalu berputar sedikit lebih lambat dibandingkan kecepatan sinkron. Selisih kecepatan tersebut disebut *slip*. Keberadaan *slip* sangat penting karena memungkinkan proses induksi tetap terjadi. Jika rotor berputar sama cepat dengan medan magnet stator, maka tidak akan terjadi pemotongan medan magnet dan arus induksi tidak dapat dihasilkan.

13.1.3 Konstruksi dan Karakteristik Motor Induksi

Motor induksi terdiri atas dua bagian utama, yaitu stator dan rotor. Stator merupakan bagian yang diam dan berfungsi menghasilkan medan magnet berputar. Komponen ini tersusun atas inti besi laminasi dan kumparan-kumparan yang dirancang untuk menghasilkan fluks magnetik secara efisien. Penggunaan laminasi pada inti stator bertujuan mengurangi rugi-rugi arus pusar (*eddy current losses*) sehingga efisiensi motor dapat ditingkatkan.

Rotor merupakan bagian yang berputar akibat interaksi elektromagnetik dengan medan magnet stator. Berdasarkan konstruksinya, rotor dibedakan menjadi rotor sangkar tupai (*squirrel cage rotor*) dan rotor belitan (*wound rotor*). Rotor sangkar tupai memiliki konstruksi sederhana berupa batang-batang konduktor yang dihubungkan oleh cincin hubung singkat pada kedua ujungnya. Jenis ini paling banyak digunakan karena kokoh, murah, dan mudah dalam pemeliharaan. Sementara itu, rotor belitan menggunakan kumparan yang dihubungkan dengan *slip ring* sehingga memungkinkan pengaturan tahanan eksternal untuk meningkatkan torsi awal motor (Sen, 2014).

Karakteristik penting motor induksi meliputi torsi, efisiensi, faktor daya, dan *slip*. Motor induksi umumnya memiliki efisiensi yang tinggi pada kondisi beban normal serta mampu menghasilkan torsi yang cukup besar untuk berbagai aplikasi industri. Faktor daya motor akan meningkat seiring bertambahnya beban yang diterima. Sementara itu, nilai *slip* pada kondisi operasi normal biasanya berkisar antara 1% hingga 6%, tergantung pada desain dan kapasitas motor.

13.1.4 Aplikasi Motor Induksi dalam Industri

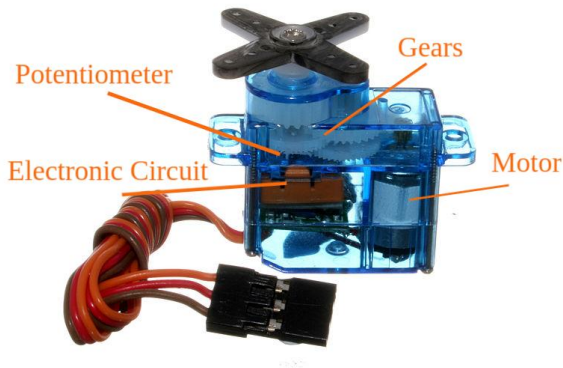
Motor induksi memiliki peranan yang sangat penting dalam sistem produksi modern karena mampu menggerakkan berbagai jenis peralatan industri secara andal dan efisien. Pada industri manufaktur, motor induksi digunakan untuk menggerakkan konveyor yang berfungsi memindahkan material dari satu proses ke proses lainnya. Selain itu, motor ini juga banyak digunakan pada pompa untuk sistem distribusi fluida, kompresor udara, kipas ventilasi, serta berbagai mesin pengolahan yang memerlukan tenaga mekanik secara kontinu.

Perkembangan teknologi otomasi semakin meningkatkan penggunaan motor induksi melalui integrasi dengan *Variable Frequency Drive* (VFD). Perangkat ini memungkinkan pengaturan frekuensi sumber listrik sehingga kecepatan putaran motor dapat dikendalikan sesuai kebutuhan proses. Penggunaan VFD tidak hanya meningkatkan fleksibilitas operasi, tetapi juga membantu mengurangi konsumsi energi dan meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan. Oleh karena itu, motor induksi tetap menjadi

pilihan utama dalam berbagai sektor industri karena menawarkan kombinasi antara keandalan, kemudahan perawatan, dan biaya operasional yang relatif ekonomis.

13.2 Servo Motor

13.2.1 Pengertian Servo Motor



Gambar 13.2. Servo Motor

Sumber: <https://share.google/pzQaE8Jlx8p9sSTJw>

Servo motor merupakan motor listrik yang dirancang untuk menghasilkan gerakan dengan tingkat presisi tinggi dalam pengaturan posisi, kecepatan, dan percepatan. Berbeda dengan motor listrik konvensional yang hanya mengubah energi listrik menjadi energi mekanik berupa putaran, servo motor bekerja menggunakan sistem kendali tertutup (*closed-loop control*) yang memanfaatkan sinyal umpan balik (*feedback*) untuk mengontrol pergerakan motor secara akurat. Sistem ini memungkinkan motor mengetahui posisi aktualnya dan membandingkannya dengan posisi yang diinginkan sehingga dapat melakukan koreksi secara otomatis apabila terjadi penyimpangan. Karena kemampuannya tersebut,

servo motor banyak digunakan pada sistem otomasi industri, robotika, mesin CNC, dan berbagai aplikasi yang membutuhkan tingkat ketelitian tinggi (Hughes & Drury, 2019).

13.2.2 Prinsip Kerja Servo Motor

Prinsip kerja servo motor didasarkan pada mekanisme umpan balik yang berlangsung secara terus-menerus selama sistem beroperasi. Ketika pengendali (*controller*) memberikan perintah berupa posisi atau kecepatan tertentu, servo drive akan mengatur suplai daya yang diberikan kepada motor. Selama motor bergerak, sensor umpan balik seperti encoder atau resolver akan mengirimkan informasi mengenai posisi dan kecepatan aktual motor kepada pengendali. Data tersebut kemudian dibandingkan dengan nilai referensi yang telah ditetapkan sebelumnya. Apabila terdapat perbedaan atau *error*, pengendali akan menghasilkan sinyal koreksi sehingga motor bergerak hingga mencapai kondisi yang diinginkan. Mekanisme ini memungkinkan servo motor menghasilkan gerakan yang presisi, stabil, dan responsif terhadap perubahan kondisi operasi (Bolton, 2021).

13.2.3 Karakteristik dan Jenis Servo Motor

Servo motor memiliki beberapa karakteristik yang membedakannya dari motor listrik lainnya. Karakteristik tersebut meliputi kemampuan menghasilkan posisi yang akurat, respons yang cepat terhadap perubahan perintah, pengaturan kecepatan yang presisi, serta kemampuan mempertahankan performa pada berbagai kondisi beban. Selain itu, servo motor juga mampu menghasilkan torsi yang tinggi dengan tingkat efisiensi yang baik sehingga cocok

digunakan pada sistem yang memerlukan pengendalian gerakan secara kontinu dan berulang.

Berdasarkan konstruksi dan sumber dayanya, servo motor dapat dibedakan menjadi servo motor DC dan servo motor AC. Servo motor DC menggunakan sumber arus searah (*Direct Current*) dan banyak digunakan pada aplikasi berdaya kecil hingga menengah. Sementara itu, servo motor AC menggunakan sumber arus bolak-balik (*Alternating Current*) serta memiliki efisiensi yang lebih tinggi, daya yang lebih besar, dan umur pakai yang lebih panjang. Perkembangan teknologi juga menghasilkan servo motor *brushless* yang tidak menggunakan sikat (*brush*) sehingga memiliki tingkat keausan yang lebih rendah dan kebutuhan perawatan yang lebih sedikit (Hughes & Drury, 2019).

13.2.4 Aplikasi Servo Motor dalam Industri

Servo motor banyak digunakan dalam berbagai sektor industri karena kemampuannya menghasilkan gerakan yang akurat dan dapat dikontrol secara presisi. Pada industri manufaktur, servo motor digunakan pada mesin CNC untuk mengatur posisi meja kerja dan alat potong dengan tingkat ketelitian yang tinggi. Dalam bidang robotika, servo motor berfungsi mengendalikan gerakan lengan robot sehingga mampu melakukan pekerjaan yang membutuhkan akurasi tinggi secara berulang.

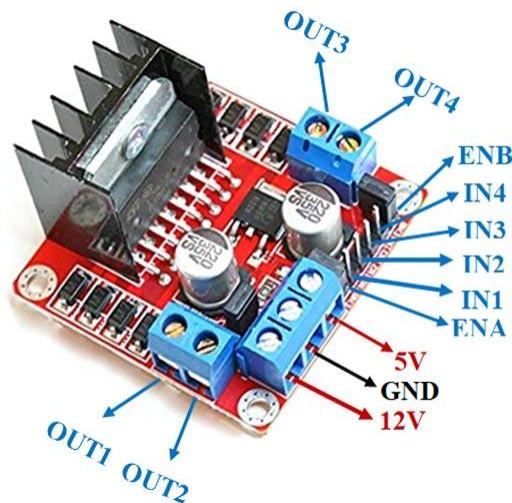
Selain itu, servo motor juga diterapkan pada sistem konveyor otomatis, mesin pengemasan, mesin pelabelan, mesin percetakan, serta berbagai peralatan produksi modern lainnya. Penggunaan servo motor memungkinkan peningkatan kualitas produk, efisiensi proses

produksi, dan pengurangan kesalahan operasional. Oleh karena itu, servo motor menjadi salah satu komponen utama dalam pengembangan sistem otomasi industri yang semakin canggih dan terintegrasi (Bolton, 2021).

13.3 Driver Motor

13.3.1 Pengertian Driver Motor

Driver motor adalah perangkat elektronik yang berfungsi sebagai penghubung antara sistem pengendali, seperti PLC, mikrokontroler, atau komputer industri, dengan motor listrik. Driver motor bertugas mengatur suplai daya, arah putaran, kecepatan, torsi, serta karakteristik operasi motor sesuai dengan sinyal kendali yang diberikan. Karena keluaran sinyal dari PLC atau mikrokontroler umumnya memiliki daya yang kecil, diperlukan driver motor untuk memperkuat sinyal tersebut agar mampu menggerakkan motor secara aman dan efisien.



Gambar 13.3. Driver Motor

Sumber: <https://share.google/fVMmpqhEELxmr1sl0>

Dalam sistem otomasi industri, driver motor memiliki peranan penting karena mampu memberikan kontrol yang lebih presisi dibandingkan pengoperasian motor secara langsung. Driver menerima sinyal masukan berupa sinyal digital atau analog, kemudian mengolahnya menjadi sinyal daya yang sesuai dengan kebutuhan motor. Penggunaan driver motor tidak hanya meningkatkan kinerja sistem, tetapi juga memberikan perlindungan terhadap kondisi seperti arus berlebih, tegangan berlebih, dan panas berlebih yang dapat merusak motor maupun peralatan kontrol lainnya.

Perkembangan teknologi elektronika daya telah menghasilkan berbagai jenis driver motor yang dapat digunakan untuk motor DC, motor AC, servo motor, maupun stepper motor. Pemilihan driver yang tepat sangat memengaruhi performa sistem penggerak, terutama pada aplikasi yang membutuhkan akurasi posisi, kecepatan, dan torsi yang tinggi.

13.3.2 Fungsi dan Prinsip Kerja Driver Motor

Fungsi utama driver motor adalah mengubah sinyal kontrol menjadi energi listrik yang sesuai untuk mengoperasikan motor. Selain itu, driver juga berfungsi sebagai pengatur kecepatan, arah putaran, percepatan, perlambatan, serta sistem proteksi motor. Pada motor DC, driver biasanya menggunakan teknik *Pulse Width Modulation* (PWM) untuk mengatur kecepatan motor dengan mengubah lebar pulsa tegangan yang diberikan ke motor. Semakin

besar nilai *duty cycle*, semakin tinggi tegangan rata-rata yang diterima motor sehingga kecepatan putarnya meningkat.

Pada motor AC, driver sering disebut sebagai *Variable Frequency Drive* (VFD) atau inverter. Perangkat ini bekerja dengan mengubah frekuensi dan tegangan keluaran untuk mengendalikan kecepatan putaran motor induksi. Dengan mengatur frekuensi suplai, kecepatan motor dapat diubah secara bertahap tanpa kehilangan efisiensi yang signifikan (Wildi, 2020).

Sementara itu, pada sistem servo dan stepper motor, driver berfungsi menerjemahkan pulsa kendali menjadi gerakan yang presisi. Driver akan mengatur urutan pemberian arus pada lilitan motor sehingga rotor dapat bergerak sesuai posisi yang diinginkan. Kemampuan tersebut menjadikan driver motor sebagai komponen utama dalam sistem robotika, mesin CNC, dan otomasi manufaktur modern.

13.3.3 Jenis-Jenis Driver Motor Industri

Dalam aplikasi industri terdapat beberapa jenis driver motor yang umum digunakan sesuai dengan karakteristik motor yang dikendalikan.

1. Driver Motor DC

Driver motor DC digunakan untuk mengendalikan motor arus searah. Pengaturan kecepatan biasanya dilakukan menggunakan metode PWM, sedangkan perubahan arah putaran dilakukan dengan rangkaian *H-Bridge*. Driver jenis ini banyak digunakan pada sistem konveyor kecil, kendaraan otomatis, dan peralatan robotik.

2. Variable Frequency Drive (VFD)

VFD merupakan driver yang dirancang khusus untuk motor AC. Perangkat ini mampu mengubah frekuensi dan tegangan keluaran sehingga kecepatan motor dapat diatur secara fleksibel. Penggunaan VFD banyak ditemukan pada pompa, kipas industri, kompresor, dan sistem transportasi material karena mampu meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi arus awal (*starting current*).

3. Driver Stepper Motor

Driver stepper motor digunakan untuk mengendalikan motor stepper yang bergerak dalam langkah-langkah tertentu (*steps*). Driver menerima sinyal pulsa dari pengendali dan mengubahnya menjadi urutan aktivasi kumparan motor. Jenis driver ini banyak digunakan pada printer 3D, mesin CNC, dan sistem positioning otomatis yang membutuhkan akurasi tinggi.

4. Driver Servo Motor

Driver servo motor berfungsi mengendalikan posisi, kecepatan, dan torsi motor servo melalui sistem umpan balik (*feedback*). Driver akan membandingkan posisi aktual dengan posisi yang diperintahkan, kemudian melakukan koreksi secara otomatis apabila terjadi kesalahan. Karena tingkat presisinya yang tinggi, servo drive banyak digunakan pada robot industri, mesin pengemasan, dan sistem manufaktur modern.

13.3.4 Penerapan Driver Motor dalam Otomasi Industri

Driver motor digunakan hampir di seluruh sistem otomasi industri yang melibatkan pergerakan mekanis. Pada sistem konveyor, driver mengatur kecepatan motor agar sesuai dengan

kebutuhan produksi. Pada mesin pengisian dan pengemasan, servo drive digunakan untuk memastikan posisi aktuator bergerak secara presisi dan berulang dengan tingkat kesalahan yang sangat kecil.

Pada industri manufaktur modern, penggunaan VFD memungkinkan pengaturan kecepatan motor sesuai beban kerja aktual sehingga konsumsi energi dapat ditekan secara signifikan. Selain itu, driver motor juga mendukung integrasi dengan PLC melalui berbagai protokol komunikasi industri, seperti Modbus, Profibus, EtherNet/IP, dan CANopen, sehingga proses pengendalian dapat dilakukan secara terpusat dan lebih fleksibel (Bolton, 2021).

Dengan kemampuannya dalam mengatur dan melindungi motor listrik, driver motor menjadi komponen penting dalam sistem otomasi industri modern. Pemahaman mengenai fungsi, jenis, dan prinsip kerja driver motor sangat diperlukan untuk merancang sistem penggerak yang efisien, andal, dan sesuai dengan kebutuhan aplikasi industri.

13.4 Aktuator Industri

13.4.1 Pengertian Aktuator Industri

Aktuator industri adalah perangkat yang berfungsi mengubah energi listrik, pneumatik, hidrolik, atau bentuk energi lainnya menjadi gerakan mekanis yang digunakan untuk menjalankan suatu proses atau peralatan industri. Dalam sistem otomasi, aktuator merupakan komponen keluaran (*output device*) yang bertugas melaksanakan perintah dari sistem pengendali seperti

PLC, mikrokontroler, atau komputer industri. Setelah sensor mendeteksi kondisi tertentu dan pengendali memproses informasi yang diterima, aktuator akan menghasilkan gerakan atau gaya yang diperlukan untuk melakukan pekerjaan fisik, seperti membuka dan menutup katup, menggerakkan konveyor, mengangkat benda, atau memposisikan komponen pada mesin produksi. Oleh karena itu, aktuator menjadi salah satu elemen penting yang memungkinkan sistem otomasi bekerja secara efektif dan efisien (Bolton, 2021).

13.4.2 Jenis-Jenis Aktuator Industri

Berdasarkan sumber energi yang digunakan, aktuator industri dapat dibedakan menjadi aktuator listrik, aktuator pneumatik, dan aktuator hidrolis. Aktuator listrik menggunakan energi listrik untuk menghasilkan gerakan mekanis dan banyak digunakan karena memiliki tingkat akurasi yang tinggi serta mudah diintegrasikan dengan sistem kendali modern. Contoh aktuator listrik antara lain motor DC, motor AC, motor servo, motor stepper, dan solenoid. Aktuator jenis ini banyak ditemukan pada robot industri, mesin CNC, sistem konveyor otomatis, dan berbagai peralatan produksi yang memerlukan pengendalian posisi serta kecepatan yang presisi.

Aktuator pneumatik menggunakan udara bertekanan sebagai sumber tenaga untuk menghasilkan gerakan linear maupun rotasi. Aktuator ini banyak digunakan dalam industri manufaktur karena memiliki konstruksi yang sederhana, biaya perawatan yang relatif rendah, serta mampu bekerja dengan kecepatan tinggi. Dalam sistem pneumatik, udara bertekanan dialirkan ke dalam silinder sehingga

piston dapat bergerak maju atau mundur sesuai kebutuhan proses. Penggunaan aktuator pneumatik sangat umum dijumpai pada sistem penjepit otomatis, alat pemindah barang, serta berbagai mesin produksi yang memerlukan gerakan berulang dengan kecepatan tinggi. Sementara itu, aktuator hidrolik memanfaatkan tekanan fluida cair untuk menghasilkan gaya yang besar. Dibandingkan dengan aktuator pneumatik, aktuator hidrolik mampu menghasilkan tenaga yang jauh lebih besar sehingga cocok digunakan pada aplikasi berat seperti mesin pres, alat berat, dan mesin pembentuk logam (Petruzella, 2022).

13.4.3 Prinsip Kerja Aktuator Industri

Prinsip kerja aktuator industri pada dasarnya adalah mengubah energi masukan menjadi energi mekanis yang dapat digunakan untuk melakukan suatu pekerjaan. Pada aktuator listrik, energi listrik diubah menjadi gerakan melalui interaksi medan elektromagnetik yang terdapat pada motor atau solenoid. Pada aktuator pneumatik, udara bertekanan digunakan untuk mendorong piston sehingga menghasilkan gerakan linear atau rotasi. Sementara itu, pada aktuator hidrolik, tekanan fluida cair dimanfaatkan untuk menggerakkan piston atau motor hidrolik sehingga menghasilkan gaya yang besar. Dalam sistem otomasi, aktuator menerima sinyal dari pengendali seperti PLC. Ketika sinyal keluaran aktif, aktuator akan bergerak sesuai instruksi yang diberikan. Sebagai contoh, PLC dapat mengaktifkan katup solenoid yang mengalirkan udara bertekanan ke silinder pneumatik sehingga piston bergerak maju untuk menjalankan proses tertentu. Kemampuan mengubah sinyal

kontrol menjadi gerakan fisik inilah yang menjadikan aktuator sebagai komponen utama dalam sistem pengendalian otomatis (Bolton, 2021).

13.4.4 Aplikasi Aktuator dalam Sistem Otomasi Industri

Aktuator industri memiliki peranan yang sangat penting dalam berbagai sistem otomasi modern. Pada sistem konveyor otomatis, motor listrik digunakan untuk menggerakkan sabuk konveyor sehingga material dapat berpindah dari satu stasiun kerja ke stasiun lainnya secara otomatis. Dalam bidang robotika industri, motor servo dan motor stepper digunakan untuk mengendalikan posisi lengan robot dengan tingkat ketelitian yang tinggi sehingga mampu melakukan proses perakitan, pengelasan, maupun pemindahan barang secara akurat. Pada sistem pneumatik, silinder digunakan untuk mendorong, menjepit, mengangkat, dan memindahkan benda kerja sesuai urutan kerja yang telah diprogram. Sementara itu, dalam industri berat, aktuator hidrolik digunakan pada mesin pres, alat pengangkat, dan berbagai peralatan produksi yang membutuhkan gaya besar. Seiring perkembangan teknologi Industri 4.0, aktuator modern kini banyak dilengkapi dengan sensor posisi, sistem umpan balik (*feedback*), serta kemampuan komunikasi digital yang memungkinkan integrasi dengan jaringan industri dan sistem pemantauan berbasis komputer secara *real-time*. Dengan kemampuan tersebut, aktuator tidak hanya berfungsi sebagai penggerak mekanis, tetapi juga menjadi bagian penting dalam mewujudkan sistem produksi yang cerdas, efisien, dan terotomasi (Petruzella, 2022).

Bab 14: Sistem Umpan Balik

Posisi

Dr. Eng. Ir. Petrus Sutiyasadi

14.1 Encoder

14.1.1 Pengertian Encoder

Encoder merupakan sensor yang digunakan untuk mendeteksi dan mengukur posisi, kecepatan, arah putaran, maupun perpindahan suatu objek mekanis. Encoder bekerja dengan mengubah gerakan mekanik menjadi sinyal listrik yang dapat diproses oleh sistem kontrol seperti Programmable Logic Controller (PLC), mikrokontroler, maupun komputer industri. Dalam sistem otomasi modern, encoder berfungsi sebagai perangkat umpan balik (*feedback device*) yang memberikan informasi posisi aktual kepada pengendali sehingga gerakan aktuator dapat dikontrol secara akurat (Bolton, 2021).



Gambar 14. 1. Encoder

Sumber: <https://share.google/fwPbWwBojwadePYBr>

Penggunaan encoder sangat penting pada sistem yang memerlukan tingkat presisi tinggi, seperti mesin CNC, robot industri, konveyor otomatis, printer industri, dan sistem pengemasan. Data yang dihasilkan encoder memungkinkan pengontrol membandingkan posisi aktual dengan posisi yang diinginkan sehingga kesalahan posisi dapat diminimalkan. Dengan demikian, encoder menjadi salah satu komponen utama dalam sistem kontrol tertutup (*closed-loop control system*).

14.1.2 Prinsip Kerja Encoder

Prinsip kerja encoder didasarkan pada proses konversi gerakan mekanik menjadi sinyal digital atau analog. Pada encoder optik, sebuah cakram (*disk*) yang memiliki pola celah atau garis-garis dipasang pada poros yang berputar. Saat cakram berputar, cahaya dari sumber LED akan terhalang atau diteruskan menuju sensor fotodetektor sehingga menghasilkan pulsa listrik. Jumlah pulsa yang dihasilkan sebanding dengan besar sudut putaran poros (Groover, 2019).

Setiap pulsa yang dihasilkan encoder mewakili perubahan posisi tertentu. Semakin banyak jumlah pulsa per putaran (*Pulses Per Revolution* atau PPR), semakin tinggi resolusi encoder tersebut. Hubungan antara sudut putaran dan jumlah pulsa dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\theta = \frac{N}{PPR} \times 360^\circ$$

di mana:

- θ = sudut putaran ($^{\circ}$)
- N = jumlah pulsa yang terdeteksi
- PPR = jumlah pulsa per putaran encoder

Melalui penghitungan pulsa ini, sistem kontrol dapat mengetahui posisi dan kecepatan putaran poros secara real-time.

14.1.3 Jenis-Jenis Encoder

Berdasarkan metode pengukurannya, encoder dibedakan menjadi encoder inkremental (*incremental encoder*) dan encoder absolut (*absolute encoder*).

Encoder Inkremental

Encoder inkremental menghasilkan pulsa-pulsa yang menunjukkan perubahan posisi relatif terhadap titik awal. Setiap perpindahan posisi akan menghasilkan sejumlah pulsa yang kemudian dihitung oleh sistem kontrol. Keunggulan encoder jenis ini adalah konstruksinya sederhana, harga relatif murah, dan mudah diintegrasikan dengan berbagai sistem otomasi. Namun, encoder inkremental tidak dapat mengetahui posisi absolut apabila sumber daya terputus karena data posisi akan kembali ke nol saat sistem dihidupkan ulang.

Encoder Absolut

Encoder absolut menghasilkan kode digital unik untuk setiap posisi poros. Dengan demikian, posisi aktual dapat diketahui secara langsung tanpa memerlukan proses penghitungan pulsa dari titik awal. Encoder jenis ini memiliki tingkat akurasi yang tinggi dan

tetap dapat mempertahankan informasi posisi meskipun terjadi pemadaman daya. Oleh karena itu, encoder absolut banyak digunakan pada aplikasi yang membutuhkan keandalan tinggi, seperti robotika, sistem navigasi, dan mesin CNC presisi (Bolton, 2021).

14.1.4 Aplikasi Encoder dalam Sistem Umpan Balik Posisi

Encoder banyak digunakan sebagai sensor umpan balik posisi pada sistem kontrol tertutup. Dalam sistem servo motor, encoder dipasang pada poros motor untuk mengukur posisi dan kecepatan putaran secara kontinu. Informasi tersebut dikirimkan ke pengendali yang kemudian membandingkan nilai aktual dengan nilai referensi. Apabila terjadi selisih (*error*), pengendali akan memberikan koreksi sehingga posisi yang diinginkan dapat dicapai secara akurat (Groover, 2019).

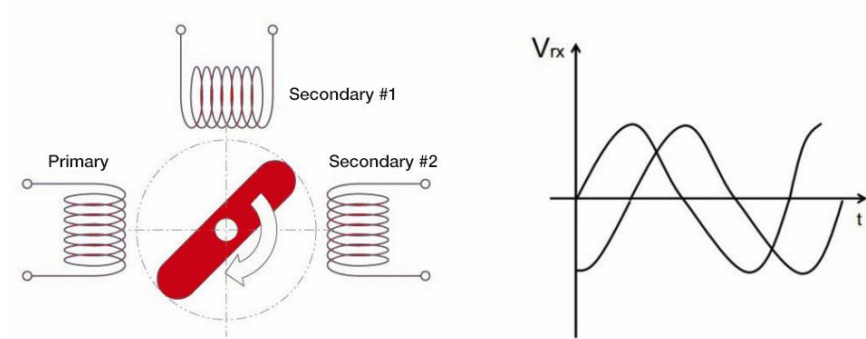
Pada robot industri, encoder digunakan untuk memantau posisi setiap sumbu gerak robot agar mampu bergerak sesuai lintasan yang telah diprogram. Dalam mesin CNC, encoder memastikan posisi pahat tetap sesuai koordinat pemesinan sehingga menghasilkan produk dengan dimensi yang presisi. Selain itu, encoder juga digunakan pada sistem konveyor otomatis, elevator, mesin cetak, dan berbagai peralatan otomasi yang memerlukan pengendalian posisi secara tepat dan berulang.

Keunggulan encoder dalam sistem umpan balik posisi meliputi tingkat akurasi tinggi, respons cepat, kemampuan integrasi dengan sistem digital, serta keandalan dalam lingkungan industri. Oleh karena itu, encoder menjadi salah satu sensor posisi yang

paling banyak digunakan dalam teknologi otomasi dan kontrol modern.

14.2 Resolver

14.2.1 Pengertian Resolver



Gambar 14.2. Resolver

Sumber: <https://share.google/qiAgX78kB9mLcIhXc>

Resolver merupakan sensor elektromekanis yang digunakan untuk mendeteksi dan mengukur posisi sudut poros yang berputar. Komponen ini bekerja berdasarkan prinsip transformator putar (*rotary transformer*) yang mengubah posisi mekanis menjadi sinyal listrik analog berupa gelombang sinus dan cosinus. Resolver banyak digunakan dalam sistem kendali gerak (*motion control*) karena memiliki tingkat keandalan yang tinggi, tahan terhadap kondisi lingkungan yang ekstrem, serta mampu bekerja pada suhu dan getaran yang tinggi. Dalam sistem servo motor, resolver berfungsi sebagai perangkat umpan balik posisi yang memberikan informasi sudut rotor kepada pengendali sehingga posisi dan kecepatan motor dapat dikontrol secara akurat (Bolton, 2021).

14.2.2 Prinsip Kerja Resolver

Prinsip kerja resolver didasarkan pada induksi elektromagnetik antara kumparan primer dan kumparan sekunder yang tersusun pada bagian stator dan rotor. Ketika kumparan primer diberi sinyal eksitasi arus bolak-balik, medan magnet yang dihasilkan akan menginduksikan tegangan pada dua kumparan sekunder yang dipasang dengan perbedaan sudut 90° . Besarnya tegangan keluaran pada masing-masing kumparan berubah sesuai dengan posisi sudut rotor dan menghasilkan sinyal sinus (*sine output*) serta cosinus (*cosine output*).

Pengendali kemudian mengolah kedua sinyal tersebut untuk menentukan posisi sudut rotor secara tepat. Dengan membandingkan nilai sinus dan cosinus yang dihasilkan, sistem dapat menghitung posisi poros secara kontinu sepanjang rentang putaran. Metode ini memungkinkan resolver memberikan informasi posisi yang akurat meskipun berada dalam lingkungan yang banyak gangguan elektromagnetik (Hughes & Drury, 2019).

14.2.3 Karakteristik dan Keunggulan Resolver

Resolver memiliki beberapa karakteristik yang menjadikannya pilihan utama dalam aplikasi industri berat dan sistem servo berperforma tinggi. Salah satu karakteristik utama resolver adalah kemampuannya bekerja pada suhu operasi yang luas serta ketahanannya terhadap debu, kelembapan, guncangan, dan getaran. Selain itu, karena tidak menggunakan komponen optik seperti encoder optik, resolver memiliki tingkat keandalan yang lebih tinggi pada lingkungan industri yang keras.

Keunggulan lainnya adalah kemampuan memberikan sinyal posisi secara kontinu tanpa kehilangan data akibat gangguan cahaya atau kotoran. Resolver juga memiliki umur pakai yang panjang karena konstruksinya relatif sederhana dan minim komponen yang mengalami keausan. Meskipun demikian, resolver memerlukan rangkaian tambahan yang disebut *resolver-to-digital converter* (RDC) untuk mengubah sinyal analog menjadi data digital yang dapat diproses oleh sistem kendali modern (Bolton, 2021).

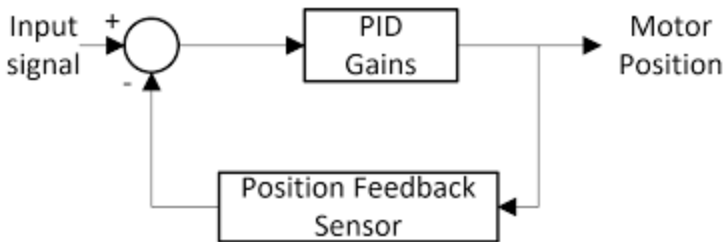
14.2.4 Aplikasi Resolver dalam Sistem Umpan Balik Posisi

Resolver banyak digunakan sebagai sensor umpan balik posisi pada sistem servo motor, robot industri, mesin CNC, kendaraan listrik, pesawat terbang, dan berbagai sistem otomasi yang membutuhkan keakuratan tinggi. Pada servo motor, resolver digunakan untuk memonitor posisi rotor secara real-time sehingga pengendali dapat melakukan koreksi terhadap kesalahan posisi maupun kecepatan secara cepat dan tepat.

Dalam industri manufaktur, resolver sering dipilih pada aplikasi yang beroperasi dalam kondisi lingkungan berat karena lebih tahan terhadap debu dan getaran dibandingkan encoder optik. Pada sektor transportasi dan kedirgantaraan, resolver digunakan untuk mengontrol aktuator dan sistem navigasi yang membutuhkan tingkat keandalan tinggi. Oleh karena itu, resolver menjadi salah satu komponen penting dalam sistem umpan balik posisi yang menuntut presisi, stabilitas, dan ketahanan operasional jangka panjang (Hughes & Drury, 2019).

14.3 Position Feedback

14.3.1 Pengertian Position Feedback



Gambar 14.3. Position feedback

Sumber: <https://share.google/VZh9bTQ6fs5RTToMUt>

Position feedback atau umpan balik posisi adalah metode pengukuran dan penyampaian informasi mengenai posisi aktual suatu komponen mekanis kepada sistem pengendali. Dalam sistem otomasi industri, position feedback berfungsi untuk memastikan bahwa posisi aktuator, motor, atau mekanisme bergerak telah mencapai posisi yang diperintahkan oleh pengendali. Informasi posisi aktual tersebut digunakan sebagai data masukan dalam sistem kendali tertutup (*closed-loop control system*) sehingga pengendali dapat membandingkan posisi yang diinginkan dengan posisi yang sebenarnya. Apabila terjadi perbedaan antara keduanya, sistem akan melakukan koreksi secara otomatis hingga posisi aktual sesuai dengan nilai referensi yang ditentukan. Keberadaan position feedback sangat penting pada aplikasi yang membutuhkan tingkat ketelitian tinggi, seperti robot industri, mesin CNC, sistem konveyor otomatis, dan berbagai peralatan manufaktur modern. Dengan adanya umpan balik posisi, sistem mampu meningkatkan akurasi,

stabilitas, dan keandalan proses kerja secara keseluruhan (Bolton, 2021).

14.3.2 Prinsip Kerja Position Feedback

Prinsip kerja position feedback diawali ketika pengendali mengirimkan perintah posisi tertentu kepada aktuator atau motor. Sensor posisi yang terpasang pada sistem kemudian mendeteksi posisi aktual dan mengirimkan informasi tersebut kembali ke pengendali sebagai sinyal umpan balik. Pengendali akan membandingkan posisi aktual dengan posisi target yang telah ditetapkan untuk menentukan besarnya kesalahan atau *error*. Apabila masih terdapat selisih antara kedua nilai tersebut, pengendali akan menghasilkan sinyal koreksi yang digunakan untuk mengatur gerakan aktuator agar mendekati posisi yang diinginkan. Proses pengukuran, perbandingan, dan koreksi ini berlangsung secara terus-menerus selama sistem beroperasi. Dengan mekanisme tersebut, sistem dapat mempertahankan akurasi posisi meskipun terjadi gangguan seperti perubahan beban, gesekan mekanis, atau getaran dari lingkungan kerja. Pada banyak aplikasi industri, position feedback dikombinasikan dengan algoritma kendali PID (*Proportional-Integral-Derivative*) untuk memperoleh respons yang cepat dan stabil (Dorf & Bishop, 2017).

14.3.3 Sensor untuk Position Feedback

Berbagai jenis sensor dapat digunakan untuk memperoleh informasi posisi dalam sistem otomasi industri. Salah satu sensor yang paling umum digunakan adalah encoder, yaitu perangkat yang mengubah gerakan mekanis menjadi sinyal listrik yang dapat dibaca

oleh sistem pengendali. Encoder tersedia dalam bentuk *incremental encoder* yang menghasilkan pulsa sesuai perubahan posisi serta *absolute encoder* yang mampu memberikan informasi posisi absolut meskipun sistem kehilangan sumber daya listrik. Selain encoder, potensiometer juga sering digunakan sebagai sensor posisi karena bekerja berdasarkan perubahan nilai resistansi yang menghasilkan tegangan keluaran sebanding dengan posisi poros atau aktuator. Pada aplikasi yang membutuhkan tingkat presisi lebih tinggi, digunakan sensor seperti *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT) yang bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik untuk mengukur perpindahan linier secara akurat. Sensor lain yang banyak digunakan pada lingkungan industri berat adalah resolver, yaitu sensor posisi berbasis transformator putar yang menghasilkan sinyal sinusoidal dan cosinusoidal sesuai sudut putaran poros. Pemilihan jenis sensor position feedback disesuaikan dengan kebutuhan akurasi, kondisi lingkungan kerja, serta karakteristik aplikasi yang digunakan.

14.3.4 Keunggulan Position Feedback dalam Otomasi Industri

Penggunaan position feedback memberikan berbagai manfaat yang signifikan dalam sistem otomasi industri. Dengan adanya informasi posisi aktual secara terus-menerus, sistem dapat mencapai tingkat akurasi yang lebih tinggi dibandingkan sistem tanpa umpan balik. Position feedback juga memungkinkan pengendali melakukan koreksi otomatis terhadap kesalahan posisi yang timbul akibat perubahan beban, keausan komponen, maupun gangguan eksternal lainnya. Selain meningkatkan akurasi, teknologi

ini berperan penting dalam menjaga stabilitas sistem sehingga proses produksi dapat berlangsung secara konsisten. Kemampuan untuk mendeteksi kesalahan posisi secara dini juga membantu mengurangi risiko kerusakan peralatan dan meningkatkan keandalan operasi. Dalam proses manufaktur modern, penggunaan position feedback berkontribusi terhadap peningkatan kualitas produk karena setiap gerakan dan posisi dapat dikontrol secara presisi sesuai spesifikasi yang ditentukan. Oleh karena itu, position feedback menjadi salah satu elemen penting dalam implementasi sistem otomasi berbasis Industri 4.0 yang menuntut efisiensi dan ketelitian tinggi.

14.3.5 Penerapan Position Feedback di Industri

Position feedback telah diterapkan secara luas dalam berbagai sektor industri yang membutuhkan pengendalian gerak secara presisi. Pada robot industri, sensor posisi digunakan untuk memastikan setiap sendi robot bergerak sesuai lintasan dan koordinat yang telah diprogram sehingga mampu melakukan tugas perakitan, pengelasan, maupun pemindahan material dengan akurat. Dalam mesin CNC, sistem position feedback berfungsi mengontrol posisi meja kerja dan alat potong dengan tingkat ketelitian yang sangat tinggi sehingga menghasilkan produk sesuai desain yang diinginkan. Pada sistem konveyor otomatis, umpan balik posisi digunakan untuk menentukan lokasi produk selama proses produksi dan pengemasan sehingga aliran material dapat dikendalikan secara efektif. Selain itu, position feedback juga banyak digunakan pada aktuator listrik dan hidrolik untuk mengatur posisi katup, silinder, maupun mekanisme penggerak lainnya. Kemampuan sistem dalam

memantau dan mengoreksi posisi secara real-time menjadikan position feedback sebagai komponen fundamental dalam berbagai aplikasi otomasi modern yang memerlukan performa tinggi, keandalan, dan konsistensi operasional (Petruzella, 2017).

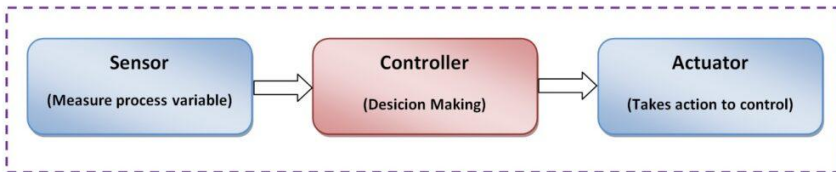
Bab 15: Integrasi Sistem

Otomasi Industri

Ir. Agus Siswoyo, S.T., M.T.

15.1 Sensor–Controller–Actuator

15.1.1 Konsep Dasar Integrasi Sensor–Controller–Actuator



Gambar 15.1. Sensor–Controller–Actuator

Sumber: <https://share.google/47SL2DAxA9CIQeJoM>

Integrasi sensor–controller–actuator merupakan fondasi utama dalam sistem otomasi industri yang memungkinkan proses produksi berjalan secara otomatis, terukur, dan terkendali. Sistem ini menghubungkan perangkat penginderaan, pengolahan data, dan pelaksana tindakan dalam satu kesatuan yang saling berinteraksi. Sensor bertugas mendeteksi kondisi fisik dari suatu proses, seperti suhu, tekanan, level cairan, atau posisi objek, kemudian mengubahnya menjadi sinyal yang dapat diproses oleh controller. Controller selanjutnya menganalisis data yang diterima berdasarkan program atau algoritma kontrol yang telah ditentukan dan menghasilkan keputusan yang sesuai. Keputusan tersebut

dikirimkan kepada actuator untuk melaksanakan tindakan fisik yang diperlukan sehingga kondisi proses dapat dipertahankan sesuai dengan target yang diinginkan. Integrasi ketiga komponen ini memungkinkan sistem bekerja secara otomatis dengan tingkat kecepatan, ketelitian, dan efisiensi yang tinggi (Bolton, 2021).

15.1.2 Peran Sensor dan Controller dalam Sistem Otomasi

Sensor dan controller merupakan dua komponen utama yang berfungsi sebagai pusat pengumpulan informasi dan pengambilan keputusan dalam sistem otomasi industri. Sensor berperan sebagai perangkat input yang terus-menerus memantau kondisi aktual proses dan mengirimkan data secara real-time kepada controller. Kualitas informasi yang dihasilkan sensor sangat menentukan akurasi pengendalian yang dilakukan oleh sistem. Setelah menerima data dari sensor, controller melakukan proses pengolahan dengan membandingkan nilai aktual terhadap nilai referensi atau setpoint yang telah ditentukan sebelumnya. Berdasarkan hasil perbandingan tersebut, controller menentukan tindakan koreksi yang diperlukan untuk menjaga kestabilan proses. Dalam praktik industri modern, controller umumnya menggunakan perangkat seperti Programmable Logic Controller (PLC), Distributed Control System (DCS), atau Industrial Computer yang mampu menjalankan berbagai algoritma pengendalian secara cepat dan andal. Kombinasi antara sensor yang akurat dan controller yang responsif menjadi faktor penting dalam meningkatkan kualitas produksi dan efisiensi operasional industri.

15.1.3 Peran Actuator dalam Pelaksanaan Kontrol

Actuator merupakan komponen yang bertugas menerjemahkan sinyal kontrol dari controller menjadi tindakan fisik pada sistem industri. Jika sensor dapat diibaratkan sebagai indera dan controller sebagai otak, maka actuator berfungsi sebagai otot yang melaksanakan perintah. Actuator dapat berupa motor listrik, katup kontrol, silinder pneumatik, silinder hidrolik, maupun perangkat mekanis lainnya yang mampu menghasilkan gerakan atau perubahan kondisi tertentu. Ketika controller mendeteksi adanya perbedaan antara kondisi aktual dan kondisi yang diinginkan, sinyal kontrol akan dikirim kepada actuator untuk melakukan tindakan koreksi. Sebagai contoh, pada sistem pengaturan suhu, actuator dapat berupa elemen pemanas atau kipas pendingin yang diaktifkan sesuai kebutuhan untuk mempertahankan suhu pada nilai yang telah ditentukan. Kinerja actuator yang cepat dan presisi sangat berpengaruh terhadap kemampuan sistem dalam menjaga stabilitas dan kualitas proses produksi.

15.1.4 Mekanisme Kerja Integrasi Sensor–Controller–Actuator

Mekanisme kerja integrasi sensor–controller–actuator berlangsung secara berkelanjutan dalam suatu siklus kontrol tertutup atau *closed-loop control system*. Proses dimulai ketika sensor mengukur kondisi aktual dari suatu proses industri dan mengirimkan data tersebut kepada controller. Controller kemudian memproses informasi yang diterima, membandingkannya dengan nilai setpoint, serta menentukan tindakan yang harus dilakukan. Hasil pengolahan

tersebut dikirim dalam bentuk sinyal kontrol kepada actuator yang selanjutnya melakukan aksi fisik pada proses. Setelah tindakan dilakukan, kondisi proses akan berubah dan kembali diukur oleh sensor sehingga terbentuk suatu sistem umpan balik (*feedback*). Siklus ini berlangsung secara terus-menerus sehingga sistem mampu merespons gangguan, perubahan beban, maupun variasi kondisi operasi secara otomatis. Penerapan mekanisme ini dapat ditemukan pada berbagai sistem industri, seperti pengendalian level tangki, pengaturan suhu ruang produksi, sistem konveyor otomatis, dan proses manufaktur berbasis Industri 4.0 yang menuntut kecepatan serta ketepatan pengendalian yang tinggi.

15.2 Sistem Otomasi Dasar

15.2.1 Pengertian Sistem Otomasi Dasar

Sistem otomasi dasar adalah sistem yang dirancang untuk menjalankan suatu proses secara otomatis dengan sedikit atau tanpa campur tangan manusia. Sistem ini memanfaatkan kombinasi perangkat keras dan perangkat lunak untuk mengendalikan operasi mesin, peralatan, atau proses industri berdasarkan instruksi yang telah ditentukan. Tujuan utama otomasi adalah meningkatkan efisiensi, produktivitas, kualitas produk, serta mengurangi kesalahan yang disebabkan oleh faktor manusia. Dalam lingkungan industri modern, sistem otomasi dasar menjadi fondasi bagi penerapan teknologi manufaktur yang lebih maju seperti sistem kendali

terdistribusi (*Distributed Control System/DCS*) dan manufaktur cerdas (*smart manufacturing*) (Groover, 2020).

15.2.2 Komponen Sistem Otomasi Dasar

Sistem otomasi dasar terdiri atas beberapa komponen utama yang bekerja secara terintegrasi. Komponen pertama adalah **sensor**, yaitu perangkat yang berfungsi mendeteksi kondisi fisik seperti suhu, tekanan, posisi, level cairan, atau keberadaan objek. Sensor mengubah besaran fisik menjadi sinyal listrik yang dapat diproses oleh sistem kendali.

Komponen kedua adalah **pengendali (controller)**, yang umumnya berupa Programmable Logic Controller (PLC), mikrokontroler, atau komputer industri. Pengendali menerima sinyal dari sensor, memproses data berdasarkan program yang telah ditentukan, kemudian menghasilkan perintah untuk mengendalikan aktuator.

Komponen ketiga adalah **aktuator**, yaitu perangkat yang mengubah sinyal kendali menjadi gerakan atau tindakan fisik. Contoh aktuator meliputi motor listrik, silinder pneumatik, katup kontrol, dan relay. Selain itu, sistem otomasi juga dilengkapi dengan **Human Machine Interface (HMI)** yang memungkinkan operator memantau dan mengendalikan proses secara visual (Bolton, 2021).

15.2.3 Prinsip Kerja Sistem Otomasi Dasar

Prinsip kerja sistem otomasi dasar mengikuti alur input–proses–output. Sensor bertindak sebagai perangkat input yang mengumpulkan data dari lingkungan atau proses industri. Data tersebut kemudian dikirimkan ke pengendali untuk dianalisis sesuai

dengan logika program yang telah dibuat. Setelah proses pengolahan selesai, pengendali mengirimkan sinyal keluaran kepada aktuator untuk melaksanakan tindakan tertentu.

Sebagai contoh, pada sistem pengisian tangki otomatis, sensor level mendeteksi tinggi permukaan cairan di dalam tangki. Ketika level cairan berada di bawah batas minimum, pengendali mengaktifkan pompa melalui aktuator. Setelah cairan mencapai batas maksimum, pengendali akan mematikan pompa secara otomatis. Siklus ini berlangsung terus-menerus untuk menjaga level cairan sesuai kebutuhan proses (Petruzella, 2021).

15.2.4 Jenis-Jenis Sistem Otomasi Dasar

Secara umum, sistem otomasi dasar dapat dibedakan menjadi beberapa jenis berdasarkan cara pengoperasiannya.

a. Otomasi Tetap (*Fixed Automation*)

Otomasi tetap dirancang untuk menghasilkan produk dengan jumlah besar dan variasi yang rendah. Sistem ini memiliki konfigurasi yang relatif permanen sehingga sulit diubah untuk jenis produk lain. Contohnya adalah lini perakitan otomatis pada industri otomotif.

b. Otomasi Terprogram (*Programmable Automation*)

Otomasi terprogram menggunakan perangkat kendali yang dapat diprogram ulang sehingga mampu menangani variasi produk yang berbeda. Sistem ini cocok untuk produksi dalam jumlah menengah dengan perubahan produk yang tidak terlalu sering. PLC merupakan contoh utama teknologi yang digunakan dalam otomasi terprogram.

c. Otomasi Fleksibel (*Flexible Automation*)

Otomasi fleksibel memungkinkan perubahan produk dilakukan dengan cepat tanpa memerlukan modifikasi besar pada sistem produksi. Sistem ini banyak diterapkan pada industri modern yang memerlukan fleksibilitas tinggi dan variasi produk yang beragam (Groover, 2020).

15.2.5 Manfaat Sistem Otomasi Dasar dalam Industri

Penerapan sistem otomasi dasar memberikan berbagai manfaat bagi industri. Otomasi dapat meningkatkan produktivitas karena proses produksi berlangsung lebih cepat dan konsisten dibandingkan pekerjaan manual. Selain itu, kualitas produk menjadi lebih seragam karena setiap proses dijalankan berdasarkan parameter yang telah ditentukan.

Dari aspek keselamatan kerja, otomasi mampu mengurangi keterlibatan manusia pada pekerjaan yang berbahaya atau berisiko tinggi. Penggunaan sistem otomatis juga membantu mengurangi biaya operasional jangka panjang melalui efisiensi penggunaan energi, bahan baku, dan tenaga kerja. Oleh karena itu, sistem otomasi dasar menjadi elemen penting dalam pengembangan industri yang kompetitif dan berkelanjutan (Bolton, 2021).

15.3 Integrasi Sistem Industri

15.3.1 Pengertian Integrasi Sistem Industri

Integrasi sistem industri merupakan proses menghubungkan berbagai perangkat, mesin, sensor, aktuator, sistem kontrol, serta perangkat lunak yang digunakan dalam lingkungan industri agar dapat bekerja sebagai satu kesatuan yang terkoordinasi. Tujuan utama integrasi sistem adalah menciptakan aliran data dan informasi yang lancar antarbagian sistem sehingga proses produksi dapat berjalan secara efektif, efisien, dan terkendali. Dalam era Industri 4.0, integrasi sistem menjadi kebutuhan penting karena perusahaan dituntut untuk menghubungkan berbagai teknologi otomatisasi, sistem informasi, dan jaringan komunikasi guna meningkatkan produktivitas serta daya saing. Melalui integrasi yang baik, data dari rantai produksi dapat dipantau secara real-time dan digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan yang lebih cepat dan akurat (Groover, 2020).

15.3.2 Tujuan Integrasi Sistem Industri

Integrasi sistem industri dilakukan untuk meningkatkan koordinasi antara berbagai komponen yang terlibat dalam proses produksi. Dengan adanya integrasi, informasi dapat mengalir secara otomatis dari satu bagian ke bagian lainnya tanpa memerlukan intervensi manual yang berlebihan. Hal ini membantu mengurangi kesalahan manusia, mempercepat proses kerja, serta meningkatkan efisiensi operasional. Selain itu, integrasi sistem memungkinkan perusahaan memperoleh data produksi secara menyeluruh sehingga

memudahkan proses pemantauan, pengendalian kualitas, pemeliharaan peralatan, dan perencanaan produksi. Kemampuan untuk mengakses data secara terpusat juga mendukung penerapan konsep manufaktur cerdas (*smart manufacturing*) yang menjadi ciri utama Industri 4.0.

15.3.3 Komponen Integrasi Sistem Industri

Integrasi sistem industri melibatkan berbagai komponen yang saling terhubung dalam suatu jaringan otomasi. Komponen pertama adalah perangkat lapangan (*field devices*) seperti sensor, aktuator, motor, dan instrumen pengukuran yang berfungsi mengumpulkan data serta melaksanakan perintah kontrol. Komponen kedua adalah sistem kontrol yang terdiri atas PLC, DCS, atau kontroler industri lainnya yang bertugas mengolah data dan mengendalikan proses. Komponen berikutnya adalah sistem supervisi seperti SCADA dan HMI yang memungkinkan operator memantau serta mengendalikan proses produksi secara visual. Selain itu, terdapat sistem manajemen tingkat atas seperti MES (*Manufacturing Execution System*) dan ERP (*Enterprise Resource Planning*) yang mengelola data produksi, inventaris, sumber daya, dan aktivitas bisnis perusahaan. Seluruh komponen tersebut dihubungkan melalui jaringan komunikasi industri sehingga informasi dapat dipertukarkan secara cepat dan akurat.

15.3.4 Metode Integrasi Sistem Industri

Integrasi sistem industri dapat dilakukan melalui beberapa pendekatan sesuai kebutuhan perusahaan. Integrasi horizontal menghubungkan berbagai mesin, peralatan, atau lini produksi yang

berada pada tingkat operasional yang sama sehingga dapat saling bertukar informasi dan bekerja secara sinkron. Integrasi vertikal menghubungkan sistem dari tingkat lapangan hingga tingkat manajemen perusahaan, memungkinkan data produksi mengalir dari sensor dan mesin menuju sistem informasi perusahaan secara langsung. Selain itu, terdapat integrasi end-to-end yang menghubungkan seluruh rantai nilai perusahaan mulai dari pemasok, proses produksi, distribusi, hingga pelanggan. Pendekatan ini memungkinkan perusahaan memperoleh visibilitas menyeluruh terhadap aktivitas operasional dan bisnis sehingga proses pengambilan keputusan dapat dilakukan secara lebih efektif.

15.3.5 Manfaat Integrasi Sistem Industri

Penerapan integrasi sistem industri memberikan berbagai manfaat yang signifikan bagi perusahaan manufaktur maupun sektor industri lainnya. Integrasi memungkinkan peningkatan efisiensi operasional karena data dapat diproses dan didistribusikan secara otomatis tanpa memerlukan banyak pekerjaan manual. Sistem yang terintegrasi juga meningkatkan akurasi informasi sehingga mengurangi risiko kesalahan dalam proses produksi maupun pengambilan keputusan. Selain itu, kemampuan pemantauan secara real-time membantu perusahaan mendeteksi gangguan atau penyimpangan proses lebih cepat sehingga tindakan korektif dapat segera dilakukan. Integrasi sistem juga mendukung peningkatan kualitas produk, pengurangan biaya operasional, optimalisasi penggunaan sumber daya, serta peningkatan fleksibilitas produksi dalam menghadapi perubahan permintaan pasar.

15.3.6 Tantangan Integrasi Sistem Industri

Meskipun menawarkan banyak keuntungan, implementasi integrasi sistem industri juga menghadapi berbagai tantangan. Salah satu tantangan utama adalah perbedaan standar komunikasi dan protokol yang digunakan oleh perangkat dari berbagai produsen. Selain itu, integrasi sistem memerlukan investasi yang cukup besar untuk pengadaan perangkat keras, perangkat lunak, serta infrastruktur jaringan yang memadai. Keamanan siber juga menjadi perhatian penting karena semakin banyak perangkat yang terhubung ke jaringan industri berpotensi meningkatkan risiko serangan siber. Tantangan lainnya meliputi kebutuhan pelatihan sumber daya manusia, kompleksitas pengelolaan data dalam jumlah besar, serta perlunya pemeliharaan sistem yang berkelanjutan agar integrasi tetap berjalan secara optimal. Oleh karena itu, perencanaan yang matang dan pemilihan teknologi yang tepat sangat diperlukan untuk memastikan keberhasilan integrasi sistem industri.

15.4 Mini Project Automation

15.4.1 Pengertian Mini Project Automation

Mini project automation merupakan kegiatan pembelajaran berbasis praktik yang bertujuan untuk mengintegrasikan berbagai komponen otomasi industri ke dalam suatu sistem kerja sederhana yang dapat beroperasi secara otomatis. Melalui kegiatan ini, peserta didik tidak hanya memahami teori mengenai sensor, aktuator, pengendali, dan sistem kontrol, tetapi juga memperoleh pengalaman

langsung dalam merancang, merakit, memprogram, serta menguji sistem otomasi. Mini project menjadi sarana yang efektif untuk menghubungkan konsep-konsep yang telah dipelajari dengan penerapannya di dunia industri sehingga peserta didik mampu memahami bagaimana suatu proses produksi dapat dijalankan secara otomatis, efisien, dan terkontrol (Bolton, 2021).

15.4.2 Perancangan dan Komponen Sistem

Dalam pelaksanaan mini project automation, tahap awal yang dilakukan adalah perancangan sistem sesuai kebutuhan proses yang akan diotomatisasi. Perancangan mencakup identifikasi tujuan sistem, pemilihan komponen, penyusunan diagram blok, serta pembuatan skema pengkabelan. Komponen yang umum digunakan meliputi sensor sebagai perangkat masukan, PLC sebagai pengendali utama, aktuator sebagai perangkat keluaran, motor penggerak, panel kontrol, serta catu daya. Setiap komponen memiliki fungsi yang saling berkaitan sehingga membentuk suatu sistem yang mampu menjalankan proses secara otomatis. Pemilihan komponen harus mempertimbangkan spesifikasi teknis, keandalan, keamanan, serta kesesuaian dengan kebutuhan aplikasi yang dirancang.

15.4.3 Implementasi dan Pengujian Sistem

Setelah proses perancangan selesai, tahap berikutnya adalah implementasi sistem yang meliputi perakitan komponen, pengkabelan, dan pemrograman PLC sesuai logika kerja yang telah ditentukan. Program PLC berfungsi mengolah sinyal masukan dari sensor dan menghasilkan keluaran yang mengendalikan aktuator atau motor. Setelah seluruh komponen terhubung dan program

selesai dibuat, dilakukan pengujian untuk memastikan bahwa sistem dapat bekerja sesuai dengan urutan operasi yang direncanakan. Pengujian bertujuan untuk mengetahui apakah sensor mampu mendeteksi kondisi dengan benar, PLC dapat memproses data secara akurat, dan aktuator memberikan respons yang sesuai. Jika ditemukan kesalahan atau gangguan, dilakukan proses troubleshooting dan perbaikan hingga sistem dapat beroperasi secara optimal (Bolton, 2021).

15.4.4 Evaluasi dan Manfaat Mini Project Automation

Evaluasi mini project automation dilakukan untuk menilai tingkat keberhasilan sistem yang telah dirancang dan diimplementasikan. Aspek yang dievaluasi meliputi ketepatan fungsi sistem, keandalan operasi, keamanan kerja, serta efisiensi proses yang dihasilkan. Melalui evaluasi tersebut, peserta didik dapat memahami kelebihan dan kekurangan dari rancangan yang dibuat sehingga mampu melakukan pengembangan lebih lanjut. Selain meningkatkan keterampilan teknis, mini project automation juga memberikan pengalaman dalam berpikir sistematis, memecahkan masalah, bekerja sama dalam tim, serta menerapkan standar kerja industri. Oleh karena itu, kegiatan ini menjadi bagian penting dalam pembelajaran otomasi industri karena mampu mempersiapkan peserta didik menghadapi kebutuhan teknologi dan proses produksi modern yang terus berkembang menuju era Industri 4.0 (Groover, 2020).

Bab 16: Tren Teknologi

Industri Modern

Ir. Eko Arianto, S.T., M.T.

16.1 Industry 4.0

16.1.1 Pengertian *Industry 4.0*

Industry 4.0 merupakan konsep revolusi industri generasi keempat yang ditandai oleh integrasi teknologi digital, sistem fisik, dan jaringan komunikasi dalam proses produksi. Konsep ini pertama kali diperkenalkan di Jerman sebagai strategi untuk meningkatkan daya saing industri melalui penerapan teknologi cerdas yang mampu menghubungkan mesin, manusia, dan sistem informasi secara real-time. Berbeda dengan revolusi industri sebelumnya yang berfokus pada mekanisasi, elektrifikasi, dan otomasi, *Industry 4.0* menekankan pada konektivitas, pertukaran data, serta pengambilan keputusan berbasis informasi digital (Schwab, 2017).

Dalam lingkungan industri modern, *Industry 4.0* memungkinkan berbagai perangkat produksi saling berkomunikasi melalui jaringan internet sehingga proses manufaktur dapat dipantau dan dikendalikan secara lebih efisien. Sistem produksi tidak lagi bekerja secara terpisah, melainkan terintegrasi dalam suatu ekosistem digital yang mampu mengumpulkan, mengolah, dan memanfaatkan data secara otomatis. Kondisi tersebut mendorong

peningkatan produktivitas, fleksibilitas produksi, serta kualitas produk yang dihasilkan.

16.1.2 Teknologi Pendukung *Industry 4.0*

Penerapan *Industry 4.0* didukung oleh berbagai teknologi digital yang saling terintegrasi. Salah satu teknologi utama adalah *Internet of Things* (IoT), yaitu konsep yang memungkinkan berbagai perangkat industri terhubung ke jaringan dan bertukar informasi secara otomatis. Melalui IoT, sensor, aktuator, mesin produksi, dan sistem kontrol dapat saling berkomunikasi untuk menyediakan data operasional secara real-time (Xu, Xu, & Li, 2018).

Selain IoT, teknologi *Big Data Analytics* juga memiliki peranan penting dalam *Industry 4.0*. Teknologi ini memungkinkan perusahaan mengolah data dalam jumlah besar untuk memperoleh informasi yang bermanfaat dalam pengambilan keputusan. Data yang berasal dari mesin, sensor, maupun sistem produksi dapat dianalisis untuk meningkatkan efisiensi operasional, memprediksi kerusakan peralatan, dan mengoptimalkan proses manufaktur.

Teknologi lainnya adalah *Artificial Intelligence* (AI), *Cloud Computing*, *Cyber-Physical Systems* (CPS), *Digital Twin*, dan robotika cerdas. Kombinasi teknologi tersebut memungkinkan sistem industri melakukan analisis, pembelajaran, dan pengambilan keputusan secara otomatis tanpa intervensi manusia secara langsung. Dengan demikian, proses produksi menjadi lebih adaptif terhadap perubahan kondisi dan kebutuhan pasar.

16.1.3 Manfaat Penerapan *Industry 4.0*

Implementasi *Industry 4.0* memberikan berbagai manfaat bagi sektor industri. Salah satu manfaat utama adalah peningkatan efisiensi produksi melalui otomatisasi dan integrasi sistem yang lebih baik. Data yang diperoleh secara real-time memungkinkan perusahaan mengidentifikasi permasalahan operasional lebih cepat sehingga tindakan korektif dapat segera dilakukan. Hal ini berkontribusi terhadap pengurangan waktu henti produksi (*downtime*) dan peningkatan produktivitas perusahaan (Schwab, 2017).

Selain meningkatkan efisiensi, *Industry 4.0* juga mendukung fleksibilitas produksi. Sistem manufaktur yang terintegrasi secara digital memungkinkan perusahaan menyesuaikan proses produksi dengan kebutuhan pelanggan secara lebih cepat. Kemampuan ini sangat penting dalam menghadapi tuntutan pasar yang semakin dinamis dan kompetitif.

Penerapan teknologi digital juga membantu meningkatkan kualitas produk melalui sistem pemantauan dan pengendalian yang lebih akurat. Sensor dan sistem analitik mampu mendeteksi penyimpangan proses sejak dini sehingga potensi cacat produk dapat diminimalkan. Di samping itu, penggunaan teknologi prediktif memungkinkan perusahaan melakukan pemeliharaan peralatan sebelum terjadi kerusakan sehingga biaya perawatan dapat ditekan.

16.1.4 Tantangan dan Implementasi *Industry 4.0*

Meskipun menawarkan berbagai keuntungan, penerapan *Industry 4.0* juga menghadapi sejumlah tantangan. Salah satu tantangan utama adalah kebutuhan investasi yang cukup besar untuk pengadaan infrastruktur digital, perangkat komunikasi, sensor, serta sistem pengolahan data. Perusahaan juga memerlukan sumber daya manusia yang memiliki kompetensi dalam bidang teknologi informasi, otomasi, dan analisis data agar mampu mengoperasikan sistem secara optimal (Xu et al., 2018).

Tantangan lainnya berkaitan dengan keamanan siber (*cybersecurity*). Semakin banyak perangkat yang terhubung ke jaringan, semakin besar pula risiko terjadinya serangan siber yang dapat mengganggu operasional perusahaan. Oleh karena itu, perlindungan data dan sistem informasi menjadi aspek yang sangat penting dalam implementasi *Industry 4.0*.

Di berbagai sektor industri, implementasi *Industry 4.0* telah diterapkan melalui penggunaan sistem manufaktur cerdas (*smart manufacturing*), pemantauan mesin berbasis IoT, robot kolaboratif (*collaborative robots*), serta sistem pemeliharaan prediktif (*predictive maintenance*). Penerapan teknologi tersebut menunjukkan bahwa transformasi digital telah menjadi bagian penting dalam meningkatkan daya saing industri di era modern. Seiring perkembangan teknologi yang semakin pesat, *Industry 4.0* diperkirakan akan terus berkembang dan menjadi fondasi utama bagi sistem produksi masa depan yang lebih cerdas, terhubung, dan berkelanjutan.

16.2 Industrial Internet of Things (Industrial IoT)

16.2.1 Pengertian *Industrial IoT*

Industrial Internet of Things (Industrial IoT atau IIoT) merupakan penerapan teknologi *Internet of Things* pada lingkungan industri yang memungkinkan berbagai perangkat, mesin, sensor, dan sistem kontrol saling terhubung melalui jaringan komunikasi digital. Teknologi ini memungkinkan pengumpulan, pertukaran, dan pengolahan data secara real-time sehingga proses produksi dapat dipantau dan dikendalikan secara lebih efektif. IIoT menjadi salah satu komponen utama dalam implementasi Industri 4.0 karena mendukung integrasi antara sistem fisik dan sistem digital dalam kegiatan manufaktur maupun proses industri lainnya.

Melalui IIoT, data yang berasal dari berbagai peralatan industri dapat dikumpulkan secara otomatis dan digunakan untuk mendukung pengambilan keputusan yang lebih cepat dan akurat. Dengan demikian, perusahaan dapat meningkatkan efisiensi operasional, kualitas produk, serta produktivitas secara keseluruhan.

16.2.2 Komponen Utama *Industrial IoT*

Sistem IIoT terdiri atas beberapa komponen yang bekerja secara terintegrasi untuk mendukung proses pengumpulan dan pengolahan data. Komponen pertama adalah sensor dan perangkat akuisisi data yang berfungsi mengukur berbagai parameter proses seperti suhu, tekanan, kelembapan, getaran, arus listrik, dan kecepatan putaran mesin. Data yang diperoleh dari sensor kemudian

dikirim melalui jaringan komunikasi menuju sistem pengolahan data.

Komponen berikutnya adalah jaringan komunikasi yang memungkinkan pertukaran informasi antarperangkat. Teknologi komunikasi yang digunakan dapat berupa Ethernet industri, Wi-Fi, Bluetooth, maupun jaringan seluler. Setelah data diterima, sistem komputasi yang berada pada server lokal maupun *cloud* akan melakukan penyimpanan dan pengolahan data. Selanjutnya, hasil pengolahan tersebut ditampilkan melalui antarmuka pengguna sehingga operator dapat memantau kondisi sistem secara real-time (Boyes et al., 2018).

Keberadaan berbagai komponen tersebut memungkinkan terbentuknya sistem industri yang lebih terhubung, responsif, dan mampu beradaptasi terhadap perubahan kondisi operasional.

16.2.3 Cara Kerja *Industrial IoT*

Prinsip kerja IIoT dimulai dari proses pengumpulan data oleh sensor yang terpasang pada mesin atau peralatan industri. Sensor secara terus-menerus mengukur kondisi operasional dan mengirimkan data tersebut melalui jaringan komunikasi ke pusat pengolahan data. Informasi yang diterima kemudian dianalisis menggunakan perangkat lunak dan algoritma tertentu untuk menghasilkan informasi yang berguna bagi proses pengendalian dan pengambilan keputusan.

Data hasil analisis dapat digunakan untuk memantau kondisi mesin, mengidentifikasi potensi gangguan, serta mengoptimalkan proses produksi. Dalam beberapa aplikasi, hasil analisis bahkan

dapat digunakan untuk mengendalikan peralatan secara otomatis tanpa memerlukan intervensi operator. Kemampuan ini memungkinkan perusahaan meningkatkan efisiensi produksi dan mengurangi risiko terjadinya gangguan operasional (Xu et al., 2018).

Selain itu, sistem IIoT memungkinkan pemantauan jarak jauh sehingga kondisi peralatan dapat diketahui kapan saja dan dari lokasi mana pun selama terhubung dengan jaringan komunikasi yang tersedia.

16.2.4 Manfaat dan Penerapan *Industrial IoT*

Penerapan IIoT memberikan berbagai manfaat bagi sektor industri. Salah satu manfaat utamanya adalah kemampuan melakukan pemantauan kondisi peralatan secara real-time sehingga potensi kerusakan dapat diketahui lebih awal. Informasi tersebut mendukung penerapan *predictive maintenance*, yaitu metode pemeliharaan yang dilakukan berdasarkan prediksi kondisi aktual peralatan sehingga dapat mengurangi waktu henti (*downtime*) dan biaya perawatan.

Selain itu, IIoT juga membantu meningkatkan efisiensi penggunaan energi, memperbaiki kualitas produk, serta mendukung pengambilan keputusan berbasis data. Dalam industri manufaktur, teknologi ini digunakan untuk memantau kinerja mesin dan mengoptimalkan proses produksi. Pada sektor energi, IIoT dimanfaatkan untuk mengawasi kondisi jaringan distribusi dan peralatan pembangkit. Sementara itu, pada industri logistik, teknologi ini digunakan untuk pelacakan barang dan pengelolaan rantai pasok secara lebih efektif.

Meskipun menawarkan berbagai keuntungan, implementasi IIoT juga menghadapi tantangan seperti keamanan siber, kebutuhan infrastruktur teknologi informasi, serta pengelolaan data dalam jumlah besar. Oleh karena itu, penerapan IIoT memerlukan perencanaan yang matang agar manfaat yang diperoleh dapat maksimal dan risiko yang mungkin muncul dapat diminimalkan.

16.3 Smart Factory

16.3.1 Pengertian Smart Factory

Smart factory merupakan konsep manufaktur modern yang mengintegrasikan teknologi digital, sistem otomasi, komunikasi data, dan kecerdasan buatan ke dalam proses produksi. Dalam konsep ini, mesin, sensor, aktuator, sistem kontrol, dan perangkat lunak industri saling terhubung sehingga mampu bertukar informasi secara real-time. Integrasi tersebut memungkinkan proses produksi berjalan lebih efisien, fleksibel, dan responsif terhadap perubahan kondisi operasional maupun kebutuhan pasar. Smart factory menjadi salah satu komponen utama dalam implementasi Industri 4.0 karena mampu menghubungkan dunia fisik dan dunia digital melalui sistem yang cerdas dan terintegrasi (Schwab, 2017).

Berbeda dengan sistem manufaktur konvensional yang masih bergantung pada pengawasan manual, smart factory memungkinkan pengambilan keputusan dilakukan berdasarkan data yang diperoleh secara otomatis dari berbagai perangkat yang terhubung. Dengan demikian, perusahaan dapat meningkatkan

produktivitas sekaligus mengurangi potensi kesalahan yang disebabkan oleh faktor manusia.

16.3.2 Teknologi Pendukung Smart Factory

Implementasi smart factory didukung oleh berbagai teknologi yang saling terintegrasi dalam satu ekosistem industri digital. Salah satu teknologi utama adalah *Internet of Things* (IoT), yang memungkinkan sensor dan perangkat industri mengumpulkan serta mengirimkan data secara real-time. Data tersebut kemudian dapat diproses menggunakan teknologi *Big Data Analytics* untuk memperoleh informasi yang berguna dalam pengambilan keputusan.

Selain itu, teknologi *Artificial Intelligence* (AI) dan *Machine Learning* digunakan untuk menganalisis pola data, memprediksi kondisi peralatan, serta mengoptimalkan proses produksi. Teknologi *Cloud Computing* juga berperan penting dalam menyediakan penyimpanan data yang fleksibel dan memungkinkan akses informasi dari berbagai lokasi. Dukungan teknologi robotika, *Cyber-Physical Systems* (CPS), dan jaringan komunikasi industri berkecepatan tinggi semakin memperkuat kemampuan smart factory dalam menciptakan lingkungan produksi yang cerdas dan terhubung (Groover, 2020).

16.3.3 Manfaat Smart Factory

Penerapan smart factory memberikan berbagai manfaat yang signifikan bagi perusahaan manufaktur. Salah satu manfaat utama adalah peningkatan efisiensi produksi melalui otomatisasi proses dan pengurangan aktivitas manual yang tidak memberikan nilai tambah. Sistem yang mampu mengumpulkan dan menganalisis data

secara real-time memungkinkan perusahaan melakukan optimasi penggunaan bahan baku, energi, dan sumber daya lainnya.

Selain itu, smart factory juga berkontribusi terhadap peningkatan kualitas produk. Data yang diperoleh dari sensor dapat digunakan untuk memantau kualitas produksi secara berkelanjutan sehingga penyimpangan dapat dideteksi lebih awal. Teknologi ini juga mendukung penerapan *predictive maintenance*, yaitu metode pemeliharaan yang dilakukan berdasarkan prediksi kondisi peralatan sehingga risiko kerusakan mendadak dapat diminimalkan. Dengan demikian, perusahaan dapat mengurangi waktu henti produksi (*downtime*) serta meningkatkan keandalan operasional secara keseluruhan.

16.3.4 Tantangan Implementasi Smart Factory

Meskipun menawarkan berbagai keuntungan, implementasi smart factory juga menghadapi sejumlah tantangan. Salah satu tantangan utama adalah kebutuhan investasi yang relatif besar untuk pengadaan perangkat keras, perangkat lunak, sensor, jaringan komunikasi, dan infrastruktur teknologi informasi. Selain itu, integrasi antara sistem lama (*legacy systems*) dengan teknologi baru sering kali memerlukan penyesuaian yang kompleks dan membutuhkan waktu yang tidak singkat.

Keamanan siber juga menjadi perhatian penting dalam penerapan smart factory. Semakin banyak perangkat yang terhubung ke jaringan industri, semakin besar pula potensi ancaman terhadap keamanan data dan sistem operasional. Oleh karena itu, perusahaan perlu menerapkan strategi keamanan yang memadai untuk

melindungi aset digital dan informasi produksi. Tantangan lainnya adalah kebutuhan tenaga kerja yang memiliki kompetensi dalam bidang otomasi, analisis data, teknologi informasi, dan sistem kontrol industri. Keberhasilan implementasi smart factory tidak hanya ditentukan oleh teknologi yang digunakan, tetapi juga oleh kesiapan sumber daya manusia dan strategi organisasi dalam menghadapi transformasi digital industri.

16.4 Predictive Maintenance

16.4.1 Pengertian *Predictive Maintenance*

Predictive maintenance merupakan strategi pemeliharaan yang dilakukan berdasarkan kondisi aktual peralatan dengan memanfaatkan data operasional untuk memprediksi kemungkinan terjadinya kerusakan di masa mendatang. Berbeda dengan pemeliharaan korektif yang dilakukan setelah terjadi kerusakan dan pemeliharaan preventif yang dilakukan berdasarkan jadwal tertentu, *predictive maintenance* berfokus pada pemantauan kondisi peralatan secara berkelanjutan sehingga tindakan perbaikan dapat dilakukan sebelum kegagalan terjadi. Pendekatan ini memanfaatkan berbagai teknologi modern seperti sensor, *Internet of Things (IoT)*, analisis data, dan kecerdasan buatan untuk mengidentifikasi pola yang menunjukkan penurunan kinerja suatu aset industri (Mobley, 2021).

Dalam lingkungan industri modern, *predictive maintenance* menjadi salah satu komponen penting dalam transformasi digital karena memungkinkan perusahaan meningkatkan keandalan

peralatan sekaligus mengurangi biaya operasional. Dengan mengetahui kondisi mesin secara real-time, perusahaan dapat merencanakan kegiatan pemeliharaan secara lebih efektif tanpa mengganggu proses produksi yang sedang berlangsung.

16.4.2 Prinsip Kerja *Predictive Maintenance*

Prinsip kerja *predictive maintenance* diawali dengan proses pengumpulan data dari berbagai komponen mesin menggunakan sensor yang terpasang pada peralatan industri. Sensor tersebut dapat mengukur berbagai parameter seperti getaran, suhu, tekanan, arus listrik, tingkat kebisingan, dan kondisi pelumasan. Data yang diperoleh kemudian dikirim ke sistem pemantauan untuk dianalisis menggunakan perangkat lunak khusus yang mampu mengidentifikasi perubahan kondisi atau gejala awal kerusakan.

Melalui analisis data historis dan data aktual, sistem dapat mendeteksi anomali yang menunjukkan adanya penurunan performa mesin. Informasi tersebut digunakan untuk memperkirakan kapan suatu komponen berpotensi mengalami kegagalan sehingga tindakan pemeliharaan dapat dilakukan pada waktu yang paling tepat. Pendekatan ini memungkinkan perusahaan menghindari penghentian produksi yang tidak direncanakan serta meningkatkan umur pakai peralatan industri (Jardine et al., 2023).

Perkembangan teknologi *machine learning* dan kecerdasan buatan semakin meningkatkan kemampuan sistem *predictive maintenance* dalam menghasilkan prediksi yang lebih akurat. Dengan memanfaatkan algoritma analitik yang canggih, sistem

mampu mengenali pola kerusakan yang sulit dideteksi melalui metode inspeksi konvensional.

16.4.3 Manfaat Penerapan *Predictive Maintenance*

Penerapan *predictive maintenance* memberikan berbagai manfaat bagi industri modern. Salah satu manfaat utama adalah pengurangan waktu henti (*downtime*) yang tidak direncanakan. Dengan mendeteksi potensi kerusakan sebelum terjadi kegagalan total, perusahaan dapat menjadwalkan perbaikan pada waktu yang paling sesuai sehingga gangguan terhadap proses produksi dapat diminimalkan.

Selain itu, *predictive maintenance* membantu meningkatkan efisiensi biaya pemeliharaan karena penggantian komponen dilakukan berdasarkan kondisi aktual, bukan hanya berdasarkan jadwal rutin. Pendekatan ini dapat mengurangi penggantian komponen yang masih layak digunakan sekaligus mencegah kerusakan besar yang membutuhkan biaya perbaikan tinggi. Dari sisi operasional, sistem ini juga berkontribusi terhadap peningkatan keselamatan kerja karena potensi kegagalan peralatan dapat diketahui lebih awal sebelum menimbulkan risiko bagi pekerja maupun lingkungan industri.

Keuntungan lainnya adalah peningkatan produktivitas dan keandalan aset. Mesin yang selalu berada dalam kondisi optimal mampu menghasilkan kualitas produk yang lebih konsisten serta mendukung pencapaian target produksi secara berkelanjutan. Oleh karena itu, banyak perusahaan manufaktur, energi, transportasi, dan

pertambangan mulai mengintegrasikan *predictive maintenance* ke dalam strategi pengelolaan aset mereka (Mobley, 2021).

16.4.4 Penerapan *Predictive Maintenance* pada Industri Modern

Penerapan *predictive maintenance* saat ini dapat ditemukan di berbagai sektor industri yang mengandalkan peralatan dengan tingkat operasional tinggi. Dalam industri manufaktur, sistem ini digunakan untuk memantau kondisi motor listrik, pompa, kompresor, konveyor, dan mesin produksi lainnya agar dapat beroperasi secara optimal. Pada sektor pembangkit listrik, *predictive maintenance* diterapkan untuk mengawasi kondisi turbin, generator, dan transformator sehingga risiko gangguan pasokan energi dapat diminimalkan.

Di sektor minyak dan gas, teknologi ini digunakan untuk memantau kondisi pipa, pompa, dan peralatan pengeboran yang beroperasi dalam lingkungan ekstrem. Sementara itu, pada industri transportasi, *predictive maintenance* dimanfaatkan untuk memantau kondisi mesin, sistem pengereman, dan komponen penting lainnya guna meningkatkan keselamatan dan keandalan operasional. Seiring berkembangnya konsep Industri 4.0, integrasi antara sensor cerdas, *cloud computing*, *big data analytics*, dan kecerdasan buatan semakin memperkuat peran *predictive maintenance* sebagai salah satu teknologi utama dalam pengelolaan aset industri modern yang lebih efisien, adaptif, dan berkelanjutan (Lee et al., 2023).

DAFTAR PUSTAKA

- Bentley, J. P. (2021). Principles of Measurement Systems (5th ed.). Pearson Education.
- Bentley, J. P. (2021). Principles of Measurement Systems (7th ed.). Pearson Education.
- Bentley, J. P. (2023). Principles of Measurement Systems (7th ed.). Pearson Education.
- Bhosale, P., Patil, P., Jadhav, P., & More, R. (2024). Design and Development of Three-Phase Transformer. International Journal of Innovative Research in Electrical Electronics Instrumentation and Control Engineering.
- Bolton, W. (2021). Instrumentation and Control Systems (3rd ed.). Newnes.
- Bolton, W. (2021). Programmable Logic Controllers (7th ed.). Newnes.
- Boyes, H., Hallaq, B., Cunningham, J., & Watson, T. (2018). The Industrial Internet of Things (IIoT): An Analysis Framework. Computers in Industry, 101, 1–12.
- Das, J. C. (2023). Power System Protection and Switchgear. CRC Press.
- Doebelin, E. O., & Manik, D. N. (2019). Measurement Systems: Application and Design (6th ed.). McGraw-Hill Education.

- Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (2017). *Modern Control Systems* (13th ed.). Pearson.
- Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (2022). *Modern Control Systems* (14th ed.). Pearson.
- Dwivedi, D., Mitikiri, S. B., Babu, K. V. S. M., Yemula, P. K., Srinivas, V. L., Chakraborty, P., & Pal, M. (2023). Advancements in Enhancing Resilience of Electrical Distribution Systems: A Review on Frameworks, Metrics, and Technological Innovations.
- Fitrijaningsih, F., Purnamawati, D., Srisantyorini, T., Baktiansyah, A., & Triyono, A. (2023). Implementation of Occupational Safety and Health Management System in the Education Sector. *The Indonesian Journal of Occupational Safety and Health*, 12(3), 363–371.
- Fundamental Training in Instrumentation, Control, and Electrical Systems (ICES). (n.d.). *Distribusi Tenaga Listrik dan Sistem Perlindungan. Modul Pelatihan ICES*.
- Gandhi, K., Sharma, R., Gautam, P. B., & Mann, B. (2020). Calibration and Standardization. 147–173. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4167-4_6
- Gönen, T. (2023). *Electric Power Distribution Engineering* (4th ed.). CRC Press.
- Gonen, T. (2024). *Electric Power Distribution and Engineering* (4th ed.). CRC Press.

- Grcev, L., & Dawalibi, F. P. (2023). *Grounding and Earthing Practices for Electrical Safety and Power System Reliability*. Wiley.
- Groover, M. P. (2019). *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing* (5th ed.). Pearson.
- Groover, M. P. (2020). *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing* (5th ed.). Pearson.
- Groover, M. P. (2023). *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing* (5th ed.). Pearson.
- Haoran, X., & Ziyi, W. (2023). Condition Evaluation and Fault Diagnosis of Power Transformer Based on GAN-CNN. *Journal of Electrotechnology, Electrical Engineering and Management*, 6(3), 8–16.
- Harten, P. V. (2023). *Electrical Installation Technology*. Routledge.
- Hughes, A., & Drury, B. (2019). *Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications* (5th ed.). Elsevier.
- Hughes, T. A. (2021). *Programmable Logic Controllers: Hardware and Programming* (2nd ed.). ISA.
- IEC. (2023). *Low-voltage Switchgear and Controlgear—Circuit-breakers*. International Electrotechnical Commission.
- IEEE. (2023). *2023 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference Proceedings*.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2022). *IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices (IEEE Std 1366-2022)*.

- International Electrotechnical Commission. (2023). Electrical Installation Inspection and Testing Guidelines. IEC.
- International Electrotechnical Commission. (2024). IEC 60364 Low-Voltage Electrical Installations.
- International Electrotechnical Commission. (2024). IEC 60364: Low-Voltage Electrical Installations – Protection for Safety. IEC.
- International Energy Agency. (2024). Electricity 2024: Analysis and Forecast to 2026. International Energy Agency.
- International Labour Organization. (2023). Safety and Health at the Heart of the Future of Work. International Labour Office.
- Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2023). Condition-Based Maintenance and Machine Diagnostics. CRC Press.
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2023). A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems. *Manufacturing Letters*, 37, 45–52.
- Lee, J., Davari, H., Singh, J., & Pandhare, V. (2023). Industrial Artificial Intelligence for Smart Manufacturing. Springer.
- Li, Y., Wang, H., Zhang, X., & Liu, Z. (2023). Digital Monitoring and Intelligent Maintenance Technologies for Industrial Electrical Distribution Systems. *Energy Reports*, 9, 1127–1138.
- Lipták, B. G. (2022). *Instrument Engineers' Handbook: Process Measurement and Analysis* (6th ed.). CRC Press.
- Lipták, B. G. (2024). *Instrument Engineers' Handbook: Process Measurement and Analysis* (6th ed.). CRC Press.

- Liu, H., Yang, M., Chen, N., & Wang, Y. (2023). Occupational Health and Safety Risk Assessment: A Systematic Literature Review of Research Trends and Developments. *Safety Science*, 161, 106050.
- Mahamat, A., Rahman, M. M., Hasan, M. K., & Islam, M. T. (2024). Condition Monitoring of Electrical Transformers Using the Internet of Things: A Systematic Literature Review. *Applied Sciences*, 14(21), 9690.
- Mobley, R. K. (2021). *An Introduction to Predictive Maintenance* (3rd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Morris, A. S. (2020). *Measurement and Instrumentation Principles* (5th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Morris, A. S. (2021). *Measurement and Instrumentation Principles* (5th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Morris, A. S., & Langari, R. (2021). *Measurement and Instrumentation: Theory and Application* (3rd ed.). Academic Press.
- National Fire Protection Association. (2024). *NFPA 70E: Standard for Electrical Safety in the Workplace*.
- Nise, N. S. (2020). *Control Systems Engineering* (8th ed.). John Wiley & Sons.
- Occupational Safety and Health Administration. (2023). *Personal Protective Equipment*. U.S. Department of Labor.
- Patranabis, D. (2023). *Sensors and Transducers* (3rd ed.). PHI Learning.

- Pelatihan Engineer PT Sari Husada. (2026). Kendali Sekuensial. Fakultas Vokasi Universitas Sanata Dharma.
- Petruzella, F. D. (2017). *Industrial Electronics* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Petruzella, F. D. (2020). *Programmable Logic Controllers* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- Petruzella, F. D. (2020). *Programmable Logic Controllers* (6th ed.). McGraw-Hill Education.
- Petruzella, F. D. (2024). *Industrial Electronics*. McGraw-Hill Education.
- Pirade, Y. S., Amin, N., Mispan, M., & Adam, A. A. (2023). Rancang Bangun Sistem Monitoring Thermal Overload Relay pada Motor Induksi 3 Phasa. *Foristek*.
- Purnomo, H., & Nugroho, A. (2024). Electrical Maintenance and Inspection Practices in Industrial Systems. *Journal of Industrial Engineering and Maintenance*.
- Qin, J., Liu, Y., & Grosvenor, R. (2024). Industry 4.0 and Smart Manufacturing: Technologies, Applications, and Future Directions. *International Journal of Production Research*, 62(4), 1258–1274.
- Ridley, J., & Channing, J. (2023). *Safety at Work* (9th ed.). Routledge.
- Sartika, L., Prasetya, A. M., & Krisnawati, M. (2024). Sistem Proteksi Thermal Overload Relay (TOR) pada Motor Induksi 3 Phasa. *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*.

- Schneider Electric. (2024). Electrical Installation Guide. Schneider Electric.
- Schwab, K. (2017). The Fourth Industrial Revolution. Crown Business.
- Sen, P. C. (2014). Principles of Electric Machines and Power Electronics (3rd ed.). Wiley.
- Siswoyo, A. (2026). Modul Praktikum Sensor Industri. Program Studi Teknologi Rekayasa Mekatronika, Fakultas Vokasi, Universitas Sanata Dharma.
- Siswoyo, A., & Noviyanto, A. H. (2026). Modul Praktik Sensor Industri. Program Studi Teknologi Rekayasa Mekatronika, Fakultas Vokasi, Universitas Sanata Dharma.
- Stuart, B. (2019). Industrial Network Security: Securing Critical Infrastructure Networks for Smart Grid, SCADA, and Other Industrial Control Systems (2nd ed.). Syngress.
- Sulistyanto, M. P., & Artanto, D. (2026). Autonomous Maintenance dan Electrical Inspection. SGM Training Material.
- Tompkins, W. J., & Webster, J. G. (2022). Interfacing Sensors to the IBM PC. Prentice Hall.
- U.S. Department of Energy. (2023). How It Works: Electric Transmission & Distribution and Protective Measures.
- Velasco, M., Zaplana, I., Dòria-Cerezo, A., Duarte, J., & Martí, P. (2023). Introducing Modelling, Analysis and Control of Three-Phase Electrical Systems Using Geometric Algebra.
- Webb, J. W., & Reis, R. A. (2022). Programmable Logic Controllers: Principles and Applications (6th ed.). Pearson.

- Wildi, T. (2020). *Electrical Machines, Drives and Power Systems* (7th ed.). Pearson Education.
- Wildi, T. (2023). *Electrical Machines, Drives, and Power Systems* (7th ed.). Pearson Education.
- Xu, L. D., Xu, E. L., & Li, L. (2018). Industry 4.0: State of the Art and Future Trends. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2941–2962.

PROFIL PENULIS



Dr. Eng. Ir. Petrus Sutiyasadi lahir di Wonosobo pada 21 Maret 1976. Saat ini, ia berdomisili di Mergangsan, Yogyakarta. Ia memiliki hobi di bidang musik. Saat ini, ia berprofesi sebagai dosen pada Program Studi D4 Teknologi Rekayasa Mekatronika, Fakultas Vokasi, Universitas Sanata Dharma.

Melalui buku ini, ia menyampaikan bahwa sistem hidrolik mengajarkan bagaimana tekanan fluida dapat diolah menjadi kekuatan yang presisi dan bermanfaat. Ia berharap buku ini dapat menjadi langkah awal bagi para pembaca untuk memperdalam pemahaman serta menginspirasi lahirnya berbagai inovasi di bidang teknik.



Ir. Dian Artanto, S.T., M.Eng., lahir di Solo pada 10 Juni 1975. Saat ini, ia berdomisili di Sleman, Yogyakarta. Ia memiliki hobi membaca dan menonton. Saat ini, ia berprofesi sebagai dosen pada Program Studi D4 Teknologi Rekayasa Mekatronika, Fakultas Vokasi, Universitas Sanata Dharma.

Menurutnya, setiap proses dalam kehidupan perlu dijalani dengan kesabaran dan semangat. Ia menyampaikan pesan kepada pembaca bahwa “berakit-rakit ke hulu, berenang-renang kemudian,” yang bermakna bahwa perjuangan dan proses yang dilalui akan membawa hasil yang baik. Ia mengajak pembaca untuk menikmati setiap proses yang sedang terjadi, karena setiap permasalahan, bahkan ketika terasa buntu sekalipun, pasti memiliki jalan keluar. Tetap semangat dan terus berkarya.



Ir. Eko Aris Budi Cahyono, M.Eng., lahir di Cepu, Blora, pada 1 November 1972. Saat ini, ia berdomisili di Sleman, Yogyakarta. Ia berprofesi sebagai dosen pada Program Studi Teknologi Rekayasa Mekatronika, Fakultas Vokasi, Universitas Sanata Dharma, Yogyakarta. Ia memiliki hobi membaca.

Menurutnya, sistem hidrolik menunjukkan bagaimana tekanan fluida dapat diubah menjadi kekuatan yang presisi dan bermanfaat dalam berbagai aplikasi. Memahami sistem hidrolik berarti memahami salah satu fondasi penting dalam dunia teknik modern. Ia berharap buku ini dapat menjadi langkah awal yang bermakna bagi para pembaca untuk memperdalam pengetahuan serta mendorong lahirnya berbagai inovasi di bidang teknologi.



Ir. Bernardinus Sri Widodo, M.Eng., lahir di Wonogiri pada 28 Mei 1972. Saat ini, ia berdomisili di Sleman. Ia memiliki hobi traveling. Saat ini, ia berprofesi sebagai dosen pada Program Studi D3 Teknologi Elektromedis, Fakultas Vokasi, Universitas Sanata Dharma.

Menurutnya, seperti halnya perjalanan yang membuka wawasan baru, mempelajari sistem hidrolik juga menghadirkan pemahaman tentang bagaimana energi dapat dimanfaatkan secara efisien dan bermakna. Ia mengajak para pembaca untuk tidak ragu memulai proses belajar, karena setiap pengetahuan baru merupakan langkah menuju kemampuan yang lebih besar. Ia berharap buku ini dapat menjadi awal eksplorasi bagi pembaca dalam memahami dunia hidrolik.



Ir. Pippie Arbiyanti, M.Eng., lahir di Sidoarjo pada 22 Oktober 1973. Saat ini, ia berdomisili di Wirobrajan, Yogyakarta. Ia memiliki hobi traveling. Saat ini, ia berprofesi sebagai dosen pada Program Studi D4 Teknologi Rekayasa Mekatronika, Fakultas Vokasi, Universitas Sanata Dharma.

Menurutnya, seperti halnya perjalanan yang membuka wawasan baru, mempelajari sistem hidrolik juga menghadirkan pemahaman tentang bagaimana energi dapat dimanfaatkan secara efisien dan bermakna. Ia mengajak para pembaca untuk tidak ragu memulai proses belajar, karena setiap pengetahuan baru merupakan langkah menuju kemampuan yang lebih besar. Ia berharap buku ini dapat menjadi awal eksplorasi bagi pembaca dalam memahami dunia hidrolik.



Ir. Muhammad Prayadi Sulistyanto, M.Eng., lahir di Bantul pada 8 Juni 1986. Saat ini, ia berdomisili di Sentolo, Kulon Progo. Ia berprofesi sebagai dosen pada Program Studi Teknologi Elektromedis, Fakultas Vokasi, Universitas Sanata Dharma, Yogyakarta. Ia memiliki hobi di bidang otomotif dan travelling, serta memiliki minat belajar pada bidang

elektronik, mekanik, sistem, dan pemrograman.

Ia menempuh pendidikan Diploma III (D3) Mekatronika di Universitas Sanata Dharma Yogyakarta dan lulus pada tahun 2004. Kemudian, ia melanjutkan pendidikan Sarjana (S1) Teknik Elektro di universitas yang sama dan lulus pada tahun 2011. Pendidikan Magister (S2) Teknik Elektro ditempuh di Universitas Gadjah Mada dan diselesaikan pada tahun 2013. Selain itu, ia juga menyelesaikan Program Profesi Insinyur di Universitas Sanata Dharma Yogyakarta pada tahun 2024.

Melalui buku ini, ia berharap dapat menambah ilmu dan wawasan bagi para pembaca serta memberikan gambaran mengenai dunia industri saat ini. Sesuai dengan slogannya, “Tidak ada kata berhenti untuk belajar,” ia mengajak pembaca untuk terus belajar dan mengembangkan diri hingga akhir hayat.



Ir. Antonius Hendro Noviyanto, M.T., lahir di Klaten pada 1 November 1986. Saat ini, ia berdomisili di Trunuh, Klaten Selatan. Ia berprofesi sebagai dosen pada Program Studi Teknologi Elektromedis, Fakultas Vokasi, Universitas Sanata Dharma, Yogyakarta. Ia memiliki hobi traveling.

Melalui buku ini, ia mengajak para pembaca untuk mengeksplorasi dunia mekatronika, sebuah bidang yang menggabungkan keahlian teknik mesin, elektronika, informatika, dan kontrol untuk menciptakan berbagai solusi inovatif di era modern. Menurutnya, mekatronika bukan hanya tentang teori, tetapi juga tentang penerapan nyata yang mampu menjawab berbagai tantangan teknologi.

Melalui setiap bab dalam buku ini, pembaca diajak untuk berpikir kreatif, memecahkan masalah, dan mengembangkan sistem yang dapat memberikan dampak positif bagi dunia. Ia berharap pembaca dapat menikmati setiap halaman dengan penuh rasa ingin tahu, karena setiap pengetahuan yang diperoleh dapat menjadi inspirasi untuk melahirkan ide-ide baru. Semoga buku ini menjadi teman dalam perjalanan memahami dan menguasai mekatronika serta bersama-sama membangun masa depan yang lebih cerdas dan efisien melalui teknologi.



Ir. Agus Siswoyo, S.T., M.T., lahir di Gunung Kidul pada 9 Maret 1985. Saat ini, ia berdomisili di Sosrodipuran GT I/368, RT 19 RW 04, Sosromenduran, Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta, Yogyakarta. Ia memiliki hobi traveling.

Perjalanan pendidikannya dimulai dari Diploma III (D3) Mekatronika di Universitas Sanata Dharma yang diselesaikan pada tahun 2008. Ia kemudian melanjutkan pendidikan Sarjana (S1) Teknik Elektro di STT Nasional Yogyakarta dan lulus pada tahun 2012, serta meraih gelar Magister (S2) Teknik Elektro dari Politeknik Elektronika Negeri Surabaya pada tahun 2017. Pada tahun 2024, ia menyelesaikan Program Profesi Insinyur di Universitas Sanata Dharma.

Saat ini, ia berprofesi sebagai dosen tetap pada Program Studi Teknologi Rekayasa Mekatronika, Fakultas Vokasi, Universitas Sanata Dharma, Yogyakarta. Ia telah mengabdikan diri di lingkungan kampus tersebut sejak tahun 2012, ketika institusi tersebut masih bernama Politeknik Mekatronika Sanata Dharma. Sebelum menekuni dunia akademik, ia memiliki pengalaman kerja di berbagai industri, seperti PT Kalbe Farma, PT Dharma Polimetal, dan TATONAS Mfg, sehingga memiliki wawasan yang kuat mengenai keterkaitan antara teori dan praktik di dunia industri.

Selain mengajar, ia aktif membimbing mahasiswa dalam berbagai kompetisi robotika nasional, termasuk ABU Robocon, serta rutin menulis buku dan artikel ilmiah di bidang robotika, sensor, dan sistem kendali. Melalui buku ini, ia berharap para pembaca dapat memperoleh wawasan dasar yang bermanfaat mengenai rekayasa mesin serta termotivasi untuk terus belajar dan berinovasi di tengah perkembangan teknologi yang semakin pesat.



Ir. Eko Arianto, S.T., M.T., lahir di Wonogiri pada 2 Februari 1987. Saat ini, ia berdomisili di Sleman, Yogyakarta. Ia berprofesi sebagai dosen pada Program Studi D3 Teknologi Elektromedis, Fakultas Vokasi, Universitas Sanata Dharma. Ia memiliki hobi menonton film, membaca, menulis, serta mengeksplorasi seni dan kerajinan.

Melalui buku ini, ia berharap dapat menginspirasi para pembaca untuk terus belajar, berinovasi, dan berkarya di bidang teknologi.

Buku referensi berjudul Dasar-Dasar Instrumentasi, Sistem Kontrol, dan Kelistrikan Industri menyajikan pemahaman mengenai teknologi yang menjadi bagian penting dalam dunia industri modern. Buku ini membahas konsep dasar instrumentasi, pengukuran, sistem kontrol otomatis, serta pemanfaatan kelistrikan dalam mendukung berbagai proses industri.

Disusun dengan bahasa yang mudah dipahami, buku ini membantu pembaca mengenal cara kerja berbagai perangkat industri, pengendalian sistem, serta peran teknologi listrik dalam meningkatkan efisiensi dan keamanan operasional. Cocok untuk masyarakat umum, pekerja industri, maupun siapa saja yang ingin memahami perkembangan teknologi industri dan penerapannya dalam kehidupan sehari-hari.

