Sistem Mekatronika : Implementasi Mesin Pakan Dukung Ketahanan Pangan

by Andrijani Sumarahinsih

Submission date: 06-Jan-2026 09:40AM (UTC+0700)
Submission ID: 2716113402
File name: UNESCO_BOOK_-_SISTEM_MEKATRONIKA.pdf (14.45M)
Word count: 30714
Character count: 193254

SISTEM MEKATRONIKA

Implementasi Mesin Pakan Dukung Ketahanan Pangan

Andrijani Sumarahinsih
Darto
Resi Dwi Jayanti Kartika Sari
Agustin Widyastutik
Kholida Eldayanti
Silvia Wahyuningtyas

madza media

SISTEM MEKATRONIKA

Implementasi Mesin Pakan Dukung Ketahanan Pangan

Edisi Pertama
Copyright @ 2025

ISBN 978-634-243-298-3
15,5 x 23 cm
168 h.
cetakan ke-1, 2025

Penulis
Andrijani Sumarahinsih
Darto
Resi Dwi Jayanti Kartika Sari
Agustin Widyastutik
Kholida Eldayanti
Silvia Wahyuningtyas

Penerbit
Madza Media
Anggota IKAPI: No.273/JTI/2021
Kantor: Perum New Villa Bukit Sengkaling C4 No 13 Malang
redaksi@madzamedia.co.id
www.madzamedia.co.id

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh isi dengan cara apapun, termasuk dengan cara penggunaan mesin fotocopy tanpa izin sah dari penerbit.

Sistem Mekatronika

Implementasi Mesin Pakan Dukung Ketahanan Pangan

"Life isn't about finding yourself. Life is about creating yourself."
- George Bernard Shaw

Kata Pengantar

Perkembangan teknologi modern telah membawa perubahan besar dalam dunia industri, transportasi, energi, pertanian, kesehatan, hingga kehidupan sehari-hari. Salah satu bidang multidisiplin yang muncul dan berkembang pesat untuk menjawab tantangan tersebut adalah mekatronika. Sebagai integrasi dari teknik mesin, elektronika, sistem kendali, dan teknologi informasi, mekatronika berperan penting dalam melahirkan sistem otomatis yang efisien, cerdas, dan adaptif.

Buku *Sistem Mekatronika* ini disusun sebagai panduan komprehensif yang memadukan teori dasar, penjelasan komponen, hingga penerapan praktis dalam berbagai sektor. Dimulai dari konsep dasar dan sejarah perkembangan mekatronika, buku ini melanjutkan dengan pembahasan komponen mekanik, sistem elektrik, sensor dan akuisisi data, sistem kontrol, hingga contoh aplikasinya pada industri manufaktur, otomotif, energi, pertanian, dan kesehatan. Dengan pendekatan yang sistematis, setiap bab dilengkapi dengan ilustrasi, tabel, studi kasus, serta capaian pembelajaran yang memudahkan mahasiswa memahami materi secara bertahap.

Buku ini juga menekankan implementasi nyata pada mesin pakan sebagai inovasi untuk mendukung ketahanan pangan nasional. Mesin pakan berbasis mekatronika tidak hanya meningkatkan efisiensi proses produksi pakan, tetapi juga memberikan solusi berkelanjutan bagi sektor peternakan, sekaligus mendorong kemandirian pangan di era modern.

Selain ditujukan bagi mahasiswa teknik, buku ini juga dapat menjadi rujukan bagi peneliti, pendidik, dan praktisi yang ingin memahami lebih dalam mengenai integrasi sistem dalam mekatronika. Melalui pembahasan yang menekankan hubungan antara teori dan praktik, buku ini diharapkan mampu menjembatani kesenjangan antara pembelajaran akademik dan kebutuhan nyata di dunia industri.

Kami menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, masukan, serta inspirasi dalam proses penyusunan buku ini.

Akhir kata, semoga karya ini dapat menjadi sumber pengetahuan yang bermanfaat, mendorong semangat inovasi, serta berkontribusi dalam pengembangan teknologi yang berdaya guna bagi masyarakat yang memiliki minat pada bidang mekatronika dan ketahanan pangan. Semoga buku ini dapat menjadi salah satu kontribusi kecil dalam upaya memperkuat literatur teknologi di Indonesia serta mendorong lahirnya inovasi yang bermanfaat bagi masyarakat luas. Kritik dan saran dari pembaca sangat kami harapkan untuk penyempurnaan pada edisi berikutnya.

Penulis__

Ucapan Terima Kasih

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, atas limpahan rahmat dan karunia-Nya, buku ini berjudul *Sistem Mekatronika: Implementasi Mesin Pakan Dukung Ketahanan Pangan* dapat terselesaikan dengan baik. Buku ini lahir dari rangkaian kegiatan pengabdian kepada masyarakat, serta pengembangan akademik yang terintegrasi dalam bidang teknik elektro dan teknik mesin, khususnya dalam mendukung inovasi mesin pakan untuk ketahanan pangan.

Pada kesempatan ini, penulis menyampaikan terima kasih dan penghargaan yang setulus-tulusnya kepada:

1. Direktorat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat – Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi (DPPM DIKTISAINTEK) atas dukungan pendanaan melalui Nomor DIPA: *SP DIPA-139.04.1.693320/2025* revisi ke-04, tanggal 30 April 2025.
2. Lembaga Layanan Pendidikan Tinggi (LLDIKTI) atas fasilitasi dan dukungan pelaksanaan program melalui Nomor Kontrak: *124/C3/DT.05.00/PM/2025* tanggal 28 Mei 2025, serta Nomor Kontrak: *017/LL7/DT.05.00/PM/2025*.
3. Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Merdeka Malang atas pendampingan dan dukungan administratif melalui Nomor: *37/Kontrak/LPPM/UM/V/2025*.
4. Universitas Merdeka Malang, yang telah memberikan dukungan kelembagaan bagi terlaksananya penelitian, pengabdian, dan penulisan buku ini.
5. Fakultas Teknik Universitas Merdeka Malang, atas dorongan, motivasi, serta dukungan akademik yang berkesinambungan.
6. Program Studi Teknik Elektro dan Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Merdeka Malang, yang menjadi ruang akademik bagi penulis untuk mengembangkan gagasan, penelitian, serta kontribusi ilmiah.
7. Seluruh anggota tim pengabdi, yang dengan dedikasi, kerja keras, dan kebersamaan telah memberikan kontribusi besar, baik dalam

pemikiran, diskusi, implementasi kegiatan pengabdian kepada masyarakat, maupun dalam penulisan naskah buku ini.

Tanpa dukungan semua pihak, buku ini tidak mungkin dapat terselesaikan sebagaimana adanya saat ini. Semoga buku ini dapat memberikan manfaat nyata, menjadi sumber pengetahuan, serta mendukung pengembangan teknologi mekatronika dalam upaya memperkuat ketahanan pangan nasional.

Penulis

Daftar Isi

Kata Pengantar……... ii
Ucapan Terimakasih…….. iv
Daftar Isi……. vi

KONSEP DASAR MEKATRONIKA…….. 1
1.1 Pengantar Mekatronika……... 1
1.2 Integrasi Sistem Mekanik, Elektronik, dan Kontrol dalam Mekatronika…… 3
1.3 Aplikasi Mekatronika Dalam Industri…….. 8
1.4 Tujuan dan Peran Mekatronika Dalam Sistem Otomasi… 11

MEKANIK dalam SISTEM MEKATRONIKA……. 15
2.1 Mesin Penggerak Mula……... 15
2.2 Elemen Transmisi Daya dan Putaran……... 18
2.3 Sistem Penggerak Mekanik…… 42
2.4 Analisis Torsi, Beban, dan Efisiensi Mekanik……. 44
2.5 Pemilihan Material dan Struktur Mesin……... 48

SISTEM ELEKTRIK dan PENGGERAK MOTOR…… 50
3.1 Sistem Elektrik untuk Penggerak Motor…….. 50
3.2 Rangkaian Pengendali Motor……. 72
3.3 Penggunaan Inverter dan Sistem Kelistrikan Mesin…….. 79
3.4 Integrasi Inverter dengan Sistem Kelistrikan Mesin…….. 81

SENSOR dan AKUISISI DATA……... 85
4.1 Sensor……. 85
4.2 Klasifikasi Sensor……. 90
4.3 Sistem Akuisisi Data (DAQ)……... 100
4.4 Jenis-Jenis Sistem Akuisisi Data……. 103

SISTEM KONTROL dan MIKROKONTROLER…….. 107
5.1 Konsep Kontrol Otomatis……... 107
5.2 Mikrokontroler dan PLC…… 115
5.3 Diagram Kontrol dan Wiring Sistem…… 118
5.4 Interface Pengguna…….. 119

IMPLEMENTASI MESIN CETAK PAKAN…….. 123
6.1 Proses dan Kebutuhan Sistem…… 123
6.2 Desain Prototipe Mesin Pakan Berbasis Mekatronika…… 129
6.3 Implementasi dan Pengujian…….. 134
6.4 Evaluasi Performa dan Potensi Pengembangan…….. 136

Ringkasan……... 137
Soal Evaluasi…….. 142
Daftar Pustaka……... 145
Tentang Penulis…….. 156

1

KONSEP DASAR MEKATRONIKA

Capaian Pembelajaran:

1. *Diharapkan Mahasiswa mampu menjelaskan konsep dasar sistem mekatronika dan keterkaitannya antar disiplin ilmu teknik.*

1.1 Pengantar Mekatronika

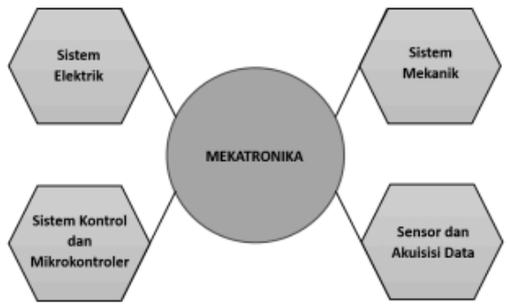
Perkembangan teknologi saat ini telah mencapai tahap integrasi antardisiplin ilmu untuk menjawab tantangan kompleks dalam dunia industri, manufaktur, pertanian, hingga kehidupan sehari-hari. Salah satu bidang multidisiplin yang muncul sebagai respons terhadap kebutuhan ini adalah mekatronika. Mekatronika pada dasarnya adalah integrasi sistem mekanik dengan elektronik dan perangkat lunak untuk menciptakan produk dan proses yang lebih fungsional dan efisien. Istilah *mechatronics* berasal dari gabungan dua kata, *mechanics* (mekanika) dan *electronics* (elektronika). Istilah ini pertama kali diperkenalkan oleh perusahaan asal Jepang, *Yaskawa Electric Corporation*, pada tahun 1969 oleh seorang insinyur bernama Tetsuro Mori (Bishop, 2002; Bolton, 2015) yaitu integrasi teknik mesin dan teknik elektro dalam perancangan produk otomatisasi industri.

Perkembangan mekatronika merupakan hasil akumulasi kemajuan dalam berbagai cabang ilmu teknik seperti mekanika, elektronika, sistem kendali, dan teknologi komputasi. Sebagai suatu bidang yang bersifat multidisiplin, mekatronika lahir dari kebutuhan akan sistem yang mampu bekerja secara otomatis, presisi, dan adaptif dalam lingkungan industri yang terus berubah (Bukhari *et al*., 2023;

Onwubolu, 2005). Setiap tahapan sejarah menunjukkan bagaimana sistem yang semula sederhana dan mekanis berevolusi menjadi sistem cerdas yang mampu merespons secara dinamis terhadap data dan kondisi lingkungan. Oleh karena itu, memahami lintasan perkembangan historis mekatronika menjadi sangat penting, karena memberikan gambaran menyeluruh tentang bagaimana integrasi teknologi telah memperkuat kapabilitas sistem otomasi (lihat Tabel 1.1). Selain itu, pemahaman ini juga memberikan dasar penalaran yang kuat bagi akademisi dalam merancang solusi teknologi baru yang lebih efisien, aman, dan berkelanjutan untuk menjawab tantangan masa depan.

Tabel 1.1 Tahapan Perkembangan Mekatronika

Dekade	Tahapan Perkembangan	Integrasi	Aplikasi Umum
1960–1970	Awal Mekatronika	Servo mekanisme, kendali analog	Robot industri awal
1970–1980	Integrasi Mikrokontroler	Mikroprosesor, sensor dasar	Mesin otomatis industri
1980–1990	Revolusi Kendali Digital	Sistem kendali berbasis komputer, SCADA	CNC, robot *pick-and-place*
1990–2000	Integrasi Sistem Terprogram	PLC, HMI, sistem cerdas terprogram	Mesin produksi massal
2000–2010	Konvergensi Teknologi Informasi	Jaringan, *software* berbasis PC	Otomatisasi pabrik, sistem *monitoring* jarak jauh
2010–Sekarang	*Smart Mechatronics* dan IoT	AI, *Machine Learning*, IoT, sensor cerdas	*Smart farming, drone, robot service*, kendaraan otonom



Gambar 1.1 Elemen utama dalam sistem mekatronika.

Elemen utama (lihat Gambar 1.1) dalam mekatronika merupakan komponen-komponen yang saling terintegrasi untuk membentuk suatu sistem (Onwubolu, 2005). Sistem mekanis berperan sebagai struktur fisik atau bagian bergerak dari perangkat, seperti roda gigi, lengan robot, rangka mesin, atau aktuator mekanik (Ryalat *et al*., 2024). Sensor dan transduser berfungsi untuk mendeteksi dan mengubah parameter fisik seperti suhu, tekanan, jarak, dan kecepatan menjadi sinyal listrik yang dapat diolah (Anantajaya *et al*., 2022). Elektrik dan elektronika digunakan untuk mengelola aliran sinyal, mengatur daya, serta mengendalikan perangkat melalui pemrosesan digital. Mikrokontroler berperan sebagai otak sistem, yang menjalankan instruksi-instruksi berdasarkan data yang diterima dari sensor. Sistem kontrol merupakan penerapan teori kendali, baik secara konvensional (seperti kendali PID) (Ahing *et al*., 2025) maupun berbasis logika fuzzy [Fathoni *et al*., 2024; Banggut *et al*., 2023) dan kecerdasan buatan, untuk menjaga sistem tetap berjalan sesuai parameter yang diinginkan. Akuisisi data mendukung proses pengolahan data, pemrograman, komunikasi data, serta integrasi dengan *Internet of Things* [Setiaji *et al*., 2022; Pandang *et al*., 2023). Seiring dengan semakin maju dan berkembangnya bidang ini, daftar topik yang relevan dalam mekatronika akan terus bertambah serta mengalami perluasan.
Sistem mekatronika dapat dikelompokkan ke dalam beberapa spesialisasi utama, yaitu:

1. Sistem Mekanik
2. Sistem Elektrik dan Penggerak Motor
3. Sensor dan Akuisisi Data
4. Sistem Kontrol dan Mikrokontroler

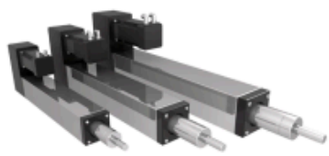
1.2 Integrasi Sistem Mekanik, Elektronik, dan Kontrol dalam Mekatronika

Mekatronika merupakan hasil integrasi dari berbagai cabang ilmu teknik, terutama teknik mesin (mekanik), teknik elektro (elektronik), dan teknik kendali (kontrol). Integrasi ini menghasilkan suatu sistem

yang tidak hanya mampu melakukan gerakan mekanis, tetapi juga memiliki kemampuan untuk mendeteksi keadaan lingkungan, memproses informasi, dan mengambil keputusan secara otomatis (Onwubolu, 2005; Cahyono *et al.*, 2025). Integrasi tidak hanya berarti penyatuan secara fisik, melainkan penggabungan fungsi dan peran antar komponen agar saling mendukung dalam menjalankan tugas secara efisien.

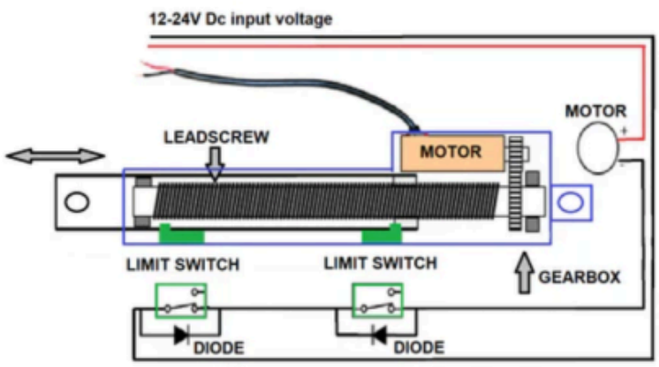
Sistem Mekanik

Sistem mekanik merupakan bagian struktural dan fungsional yang memungkinkan terjadinya gerakan fisik pada perangkat. Komponen seperti rangka, poros, roda gigi, engsel, dan aktuator mekanik seperti motor dan piston berperan penting dalam memberikan gerakan yang terukur. Desain sistem mekanik harus mempertimbangkan kekuatan bahan, efisiensi pergerakan, serta kompatibilitas dengan komponen lainnya seperti sensor dan aktuator (lihat Gambar 1.2.) (Ross *et al.*, 2024).



Gambar 1.2 Aktuator linier elektromekanis.

Aktuator linier mengubah energi listrik menjadi gerakan linier (maju–mundur) menggunakan motor DC dan mekanisme *leadscrew*.



Gambar 1.3 Rangkaian aktuator linier elektrik dengan motor DC, *leadscrew*, *gear box*, dan *limit switch*.

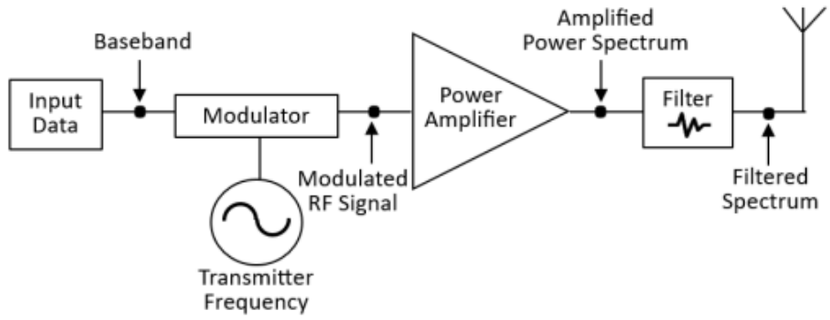
Sistem Elektrik

Sistem elektrik pada dasarnya adalah suatu rangkaian atau susunan komponen listrik/elektronik yang dirancang untuk menghasilkan, menyalurkan, mengontrol, dan memanfaatkan energi listrik agar dapat menjalankan fungsi tertentu. Sistem elektrik/elektronik berfungsi sebagai penghubung antara dunia fisik dan sistem digital. Komponen elektronik seperti sensor, penguat sinyal (lihat Gambar 1.3.), konverter analog-ke-digital (ADC), serta mikrokontroler digunakan untuk mengubah sinyal fisis menjadi data digital yang dapat diolah [Sumarahinsih *et al.*, 2023). Elektrik meliputi sistem catu daya dan rangkaian kendali yang mengatur kerja aktuator, lampu, dan perangkat lain. Dengan adanya sistem elektronik, sistem mekatronika dapat berinteraksi dengan lingkungan secara waktu nyata (*real-time*) (Sari *et al.*, 2022).



Gambar 1.4 Modul RF (Radio Frequency) transmitter dan receiver 433 MHz. Modul atas (kiri) RF Transmitter 433 MHz. Modul bawah (kanan) RF Receiver 433 MHz.

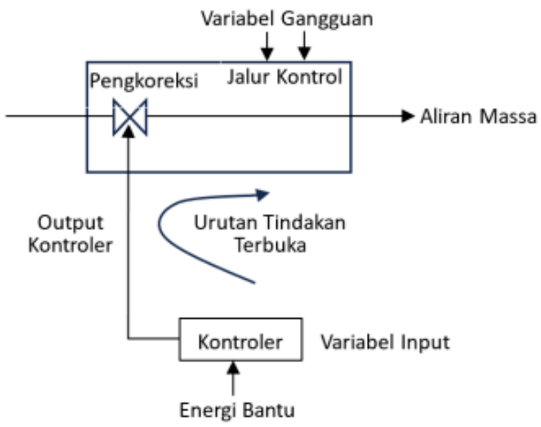
Modul ini banyak dipakai untuk proyek rrduino dan mikrokontroler, komunikasi nirkabel jarak pendek (hingga ±100–200 meter tergantung antena).



Gambar 1.5 Diagram blok sistem pemancar RF (Radio *Frequency Transmitter System*).

Sistem Kontrol

Sistem kontrol memiliki peran untuk mengatur dan mengarahkan kerja sistem secara otomatis. Berdasarkan data dari sensor, sistem kontrol akan menentukan respons yang tepat guna menjaga kestabilan dan kinerja sistem. Kontrol dapat bersifat terbuka (*open-loop*) maupun tertutup (*closed-loop*), tergantung pada keberadaan umpan balik dari lingkungan. Metode kontrol yang umum digunakan meliputi kontrol proporsional-integral-derivatif (PID), logika fuzzy, dan kecerdasan buatan. Sistem kontrol menjembatani informasi dari sensor dan memberikan perintah kepada aktuator untuk menjalankan fungsi mekanis (Fathoni *et al.*, 2024).



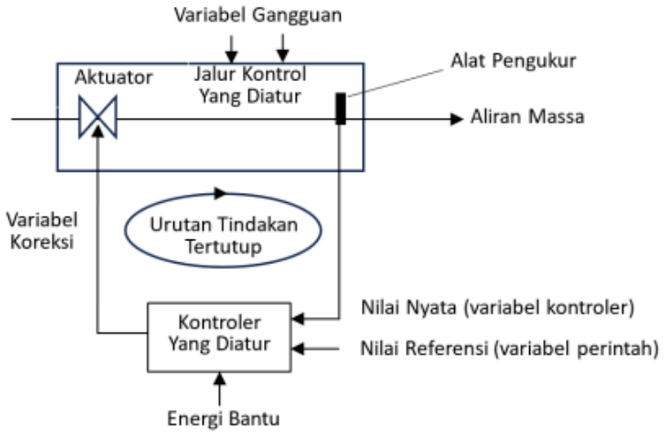
Gambar 1.6 Diagram istem kontrol *open-loop*.

Sistem kontrol loop terbuka (lihat Gambar 1.6) merupakan sistem yang beroperasi tanpa menggunakan umpan balik. Dalam sistem ini, motor digerakkan berdasarkan sinyal perintah yang diasumsikan akan diikuti secara akurat. Salah satu contoh dari sistem ini adalah motor *stepper*. Aplikasi sistem kontrol terbuka terlihat pada Gambar 1.7.



Gambar 1.7 Sistem pengujian material loop terbuka.

Sistem kontrol loop tertutup terlihat pada Gambar 1.8, sistem yang membandingkan keluaran aktual dengan sinyal perintah, lalu memanfaatkan perbedaan tersebut untuk menyesuaikan keluaran agar sesuai dengan perintah yang diinginkan. Sistem servo merupakan contoh penerapan kontrol loop tertutup.



Gambar 1.8 Sistem kontrol *closed-loop*.

Sinergi dalam Perancangan dan Implementasi

Keberhasilan sistem mekatronika sangat bergantung pada tingkat sinergi dan integrasi antara ketiga subsistem tersebut. Dalam proses perancangan, setiap komponen dirancang agar dapat saling berinteraksi dan menjalankan fungsinya tanpa hambatan. Sebagai contoh, pada sistem penyortiran otomatis, bagian mekanik bertugas memindahkan objek, bagian elektronik mendeteksi karakteristik objek, dan bagian kontrol mengambil keputusan berdasarkan data sensor tersebut. Ketiga sistem tersebut harus beroperasi dalam satu kesatuan agar sistem bekerja dengan tepat dan andal (Darto *et al*., 2021).

Dampak Integrasi terhadap Kinerja dan Inovasi

Integrasi antara sistem mekanik, elektronik, dan kontrol memberikan dampak yang signifikan terhadap efisiensi, ketepatan, serta kecerdasan operasional sistem. Integrasi keempat komponen ini memungkinkan sistem mekatronika untuk merespon lingkungan, mengambil keputusan secara otomatis, dan melakukan tugas-tugas kompleks dengan efisiensi tinggi. Integrasi ini memungkinkan

terciptanya berbagai teknologi modern seperti robot industri, kendaraan tanpa pengemudi, alat kesehatan pintar, dan sistem rumah tangga otomatis. Selain meningkatkan produktivitas, integrasi ini juga membuka peluang inovasi yang berkelanjutan dalam menghadapi tantangan global (Anantajaya *et al*., 2022).

Dengan demikian, pemahaman terhadap konsep integrasi dalam mekatronika menjadi hal yang esensial dalam pengembangan sistem cerdas yang adaptif dan relevan dengan tuntutan era teknologi digital saat ini. Mekatronika telah menjadi bagian penting dalam pengembangan sistem industri modern yang menuntut efisiensi, akurasi, dan fleksibilitas tinggi.

1.3 Aplikasi Mekatronika Dalam Industri

Mekatronika telah menjadi elemen penting dalam transformasi industri modern. Perkembangan teknologi industri dari era mekanik menuju digital telah membuka ruang yang sangat luas bagi penerapan mekatronika dalam berbagai sektor manufaktur dan layanan teknis. Dengan pendekatan yang bersifat interdisipliner, mekatronika memberikan solusi menyeluruh terhadap permasalahan efisiensi produksi, peningkatan kualitas, serta keselamatan kerja.

Otomasi Manufaktur

Sektor manufaktur merupakan salah satu bidang yang paling awal dan paling luas menerapkan mekatronika. Penggunaan robot industri, mesin CNC (*Computer Numerical Control*), serta sistem produksi fleksibel memungkinkan perusahaan memproduksi barang dengan kecepatan tinggi, presisi yang tinggi, dan biaya yang relatif rendah [Kurniawan *et al*., 2024; Mulyadi *et al*., 2022). Mekatronika memungkinkan penerapan sistem kendali real-time untuk memantau dan mengatur suhu, tekanan, kecepatan motor, dan parameter lainnya secara otomatis. Penggunaan sensor optik, aktuator elektromagnetik, serta kontrol berbasis PLC (*Programmable Logic Controller*) menjadikan proses produksi lebih stabil dan aman.

Industri Otomotif

Industri otomotif memanfaatkan mekatronika dalam berbagai aspek mulai dari proses produksi hingga fitur kendaraan itu sendiri. Dalam proses perakitan kendaraan, robot industri digunakan untuk pengelasan rangka, pengecatan bodi, dan pemasangan komponen dengan presisi tinggi. Sementara itu, pada produk kendaraan, mekatronika digunakan dalam sistem pengereman anti-*lock* (ABS), kontrol stabilitas kendaraan (ESC), pengendalian mesin elektronik (ECU), serta sistem hiburan dan navigasi. Kendaraan otonom dan sistem parkir otomatis juga merupakan produk langsung dari integrasi teknologi mekatronika yang canggih.

Industri Elektronik dan Perakitan

Industri elektronik sangat bergantung pada sistem mekatronika dalam proses perakitan komponen mikroelektronik. Mesin-mesin *pick and place* menggunakan aktuator presisi tinggi untuk menempatkan komponen kecil pada papan rangkaian cetak (PCB) dengan kecepatan dan akurasi yang luar biasa. Sensor kamera digunakan untuk melakukan inspeksi kualitas secara otomatis. Sistem ini memastikan bahwa setiap produk memenuhi standar kualitas sebelum dikirim ke konsumen.

Industri Pangan dan Minuman

Dalam industri makanan dan minuman, mekatronika digunakan untuk mengontrol proses pengemasan, pelabelan, sterilisasi, dan distribusi produk. Sistem kendali suhu dan kelembaban yang presisi penting untuk menjaga kualitas produk selama proses penyimpanan dan pengiriman. Selain itu, mekatronika juga memungkinkan pemantauan otomatis terhadap tanggal kedaluwarsa dan volume isi kemasan dengan menggunakan sensor dan sistem penglihatan mesin.

Industri Farmasi dan Alat Kesehatan

Mekatronika sangat berperan dalam pengembangan mesin produksi obat, alat diagnosis, serta perangkat terapi medis. Sistem otomatis digunakan untuk menakar dosis, mengemas obat, serta memverifikasi komposisi produk. Robot farmasi dan alat bantu bedah otomatis menjadi contoh konkret bagaimana integrasi mekanika dan sistem

kontrol dapat meningkatkan presisi dan efisiensi dalam layanan kesehatan.

Industri Energi

Dalam sektor energi, mekatronika berperan dalam pemantauan dan pengendalian sistem pembangkit tenaga listrik, baik konvensional maupun terbarukan. Pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), mekatronika digunakan untuk mengatur arah panel surya secara otomatis agar selalu menghadap matahari (solar tracking) [Sebastian *et al*., 2020; Sari *et al*., 2023]. Sementara itu, dalam sistem kelistrikan skala besar, SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) memanfaatkan komponen mekatronika untuk mengatur distribusi daya secara optimal.

Industri Pertanian dan Peternakan

Sektor pertanian modern mulai memanfaatkan mekatronika untuk meningkatkan efisiensi dan hasil panen. Contoh aplikasinya antara lain adalah traktor otomatis, sistem irigasi cerdas (Afandi *et al*., 2024). berbasis sensor tanah, serta robot pemanen. Dalam peternakan, sistem pengontrol suhu dan kelembaban kandang otomatis (Banggut *et al*., 2023), serta pemberian pakan otomatis, dapat meningkatkan produktivitas dan kesehatan hewan ternak. Teknologi drone untuk pemetaan lahan dan penyemprotan pestisida juga merupakan hasil dari integrasi sistem mekatronika.

Sistem Transportasi dan Logistik

Mekatronika digunakan dalam pengembangan sistem transportasi cerdas yang mencakup kendaraan listrik, kendaraan otonom, dan sistem manajemen lalu lintas berbasis sensor. Dalam bidang logistik, sistem pemindahan barang otomatis (*conveyor* dan AGV – *Automated Guided Vehicle*) memanfaatkan sensor jarak, motor servo, serta sistem navigasi untuk mengatur jalur distribusi secara efisien.

Aplikasi mekatronika dalam dunia industri telah terbukti mampu mendorong efisiensi, meningkatkan kualitas, dan mempercepat proses produksi. Melalui integrasi sistem mekanik, elektronik, dan kontrol, berbagai proses industri dapat dijalankan dengan lebih andal, cerdas, dan adaptif (Ryalat *et al*., 2024; Pramudita *et al*., 2024; Anaam *et al*.,

2022; Chu *et al*., 2022). Oleh karena itu, pemahaman terhadap prinsip-prinsip mekatronika dan penerapannya sangat penting bagi dunia pendidikan dan industri di era Revolusi Industri 4.0 dan menuju 5.0.

1.4 Tujuan dan Peran Mekatronika Dalam Sistem Otomasi

Tujuan Mekatronika dalam Sistem Otomasi

Dalam menghadapi tantangan dunia industri yang semakin kompleks dan dinamis, penerapan sistem otomasi menjadi sebuah kebutuhan yang tidak terelakkan. Tujuan utama dari penerapan mekatronika dalam sistem otomasi tidak hanya sebatas pada peningkatan produktivitas, tetapi juga mencakup peningkatan kualitas, keselamatan kerja, efisiensi energi, serta fleksibilitas dalam proses produksi dan layanan. Dengan memahami tujuan-tujuan tersebut secara menyeluruh, para pelaku industri dan akademisi dapat merancang dan mengembangkan sistem otomasi yang lebih unggul dan berkelanjutan (Ryalat *et al*., 2024; Chu *et al*., 2022).

Efisiensi Operasional

Tujuan utama dari penerapan mekatronika dalam sistem otomasi adalah meningkatkan efisiensi operasional. Dengan mengintegrasikan teknologi kontrol otomatis dan sistem sensorik, proses produksi atau pelayanan dapat dijalankan secara lebih cepat, akurat, dan konsisten. Hal ini berdampak langsung pada peningkatan produktivitas dan pengurangan waktu siklus produksi (Sari *et al*., 2022).

Kualitas Produk atau Layanan

Mekatronika memungkinkan penerapan sistem pengendalian kualitas secara otomatis melalui penggunaan sensor dan sistem monitoring digital. Dengan demikian, kesalahan produksi dapat dideteksi dan diperbaiki secara real-time, sehingga kualitas produk tetap terjaga sesuai standar.

Menekan Biaya Produksi

Sistem otomasi berbasis mekatronika membantu mengurangi ketergantungan terhadap tenaga kerja manusia dalam tugas-tugas berulang dan berisiko tinggi. Dengan demikian, biaya operasional jangka panjang dapat ditekan dan hasil produksi menjadi lebih kompetitif di pasar.

Keselamatan Kerja

Mekatronika memungkinkan pemantauan kondisi lingkungan kerja secara otomatis dan pengendalian mesin secara jarak jauh, sehingga risiko kecelakaan kerja dapat dikurangi. Sensor suhu, tekanan, gas, dan sistem kendali otomatis memberikan perlindungan tambahan bagi operator di lapangan.

Fleksibilitas Produksi

Dengan memanfaatkan sistem yang dapat diprogram ulang, seperti mikrokontroler dan PLC, perusahaan dapat dengan mudah mengubah konfigurasi sistem produksi untuk menyesuaikan dengan variasi produk atau permintaan pasar.

Implementasi Industri 4.0

Mekatronika menjadi fondasi penting dalam pengembangan pabrik cerdas (*smart factory*) yang menjadi ciri khas industri 4.0. Melalui integrasi dengan *Internet of Things* (IoT), kecerdasan buatan (AI), dan sistem siber-fisik (*cyber-physical systems*), mekatronika mendorong sistem otomasi yang terhubung dan berbasis data (Bukhari *et al*., 2023; Ryalat *et al*., 2024).

Peran Mekatronika dalam Sistem Otomasi

Peran mekatronika dalam sistem otomasi mencakup berbagai aspek, mulai dari tahap perancangan hingga pelaksanaan dan pemeliharaan sistem. Sebagai suatu pendekatan interdisipliner, mekatronika memungkinkan terciptanya sistem yang mampu beroperasi secara otomatis, presisi, dan responsif terhadap perubahan kondisi lingkungan. Di tengah perkembangan teknologi industri yang semakin maju, mekatronika tidak hanya berfungsi sebagai penggerak

utama otomasi, tetapi juga sebagai pendukung dalam pengembangan inovasi teknologi seperti sistem cerdas, robotika, dan *Internet of Things* (IoT) (Setiaji *et al*., 2022; Sebastian *et al*., 2020). Oleh karena itu, pemahaman terhadap peran mekatronika sangat penting untuk membangun sistem otomasi yang andal, efisien, dan relevan dengan kebutuhan industri masa kini.

Perancangan dan Implementasi Sistem Otomasi

Mekatronika berperan dalam tahap awal perancangan sistem otomasi melalui pendekatan desain terpadu. Setiap komponen mekanik, sensorik, elektronik, dan kendali dirancang secara bersamaan agar dapat bekerja secara harmonis. Pendekatan ini memungkinkan perancangan sistem yang lebih ringkas, hemat energi, dan memiliki performa optimal.

Pada tahap implementasi, mekatronika mendukung proses integrasi antarperangkat seperti aktuator, sensor, pengendali logika, dan antarmuka pengguna. Proses ini memastikan bahwa semua komponen dapat saling berkomunikasi dan berfungsi sebagai satu kesatuan sistem otomasi yang efisien (Afandi *et al*., 2024; Chu *et al*., 2022; Fandiansyah *et al*., 2022).

Pengawasan dan Diagnostik

Mekatronika memungkinkan pengawasan kondisi sistem secara terus-menerus melalui pemantauan data sensor dan aktuator. Sistem ini dapat mendeteksi gejala awal kegagalan, sehingga tindakan perbaikan dapat dilakukan sebelum kerusakan serius terjadi (Pandang *et al*., 2023).

Pemeliharaan Prediktif

Melalui data yang dikumpulkan secara real-time, sistem mekatronika dapat digunakan untuk menganalisis performa dan keausan komponen. Hal ini memungkinkan strategi pemeliharaan prediktif, yang lebih efisien dibandingkan pemeliharaan reaktif atau berkala (Sari *et al*., 2022).

Pengembangan Inovasi Teknologi

Mekatronika mendorong munculnya berbagai inovasi dalam bidang otomasi seperti robot kolaboratif (cobot), kendaraan otonom, serta sistem kendali adaptif berbasis AI. Peran ini sangat penting dalam meningkatkan daya saing industri di era global (Setiaji *et al.*, 2022; Sari *et al.*, 2024).

Edukasi dan Pelatihan Industri

Mekatronika juga berperan dalam mendukung pendidikan dan pelatihan teknis. Pembelajaran mekatronika sering kali berbasis proyek yang relevan dengan industri (Hadiputranto *et al.*, 2024; Gumilang *et al.*, 2023). Kompetensi dalam bidang mekatronika dibutuhkan oleh tenaga kerja masa depan yang mampu merancang, mengoperasikan, dan memelihara sistem otomasi yang kompleks dan cerdas.

Tujuan utama mekatronika dalam sistem otomasi adalah untuk menciptakan proses kerja yang lebih efisien, aman, dan fleksibel. Dengan pendekatan yang integratif, mekatronika mampu mendorong sistem otomasi modern yang adaptif terhadap kebutuhan industri dan perubahan teknologi. Oleh karena itu, penguasaan konsep dan aplikasi mekatronika menjadi hal yang sangat penting bagi setiap pelaku industri dan akademisi dalam menyongsong era otomatisasi dan digitalisasi yang terus berkembang.

2

KOMPONEN MEKANIK dalam SISTEM MEKATRONIKA

Capaian Pembelajaran:

1. *Diharapkan mahasiswa mampu menjelaskan peran komponen mekanik dalam sistem mekatronika.*
2. *Diharapkan mahasiswa mampu mengidentifikasi berbagai jenis transmisi mekanik dan aplikasinya.*
3. *Diharapkan mahasiswa mampu menganalisis dan merancang sistem mekanik dalam mekatronika.*

2.1 Mesin Penggerak Mula

Mesin penggerak mula (*prime mover*) adalah mesin atau alat yang mengubah energi alamiah menjadi energi mekanik (gerak), yang kemudian digunakan untuk menggerakkan peralatan lain (misalnya pompa, generator, kompresor, atau kendaraan). Dengan kata lain, mesin penggerak mula adalah sumber tenaga mekanik pertama dalam suatu sistem, yang memulai rangkaian proses kerja (Putra *et al*., 2018). Mesin penggerak mula bekerja dengan mengubah berbagai bentuk energi menjadi energi mekanik (Mahendra & Hendro, 2022). Umumnya bersumber dari:

a. Energi kimia (bahan bakar seperti bensin, solar, gas) → mesin bakar
b. Energi panas bumi / uap air → turbin uap
c. Energi air mengalir → turbin air
d. Energi angin → turbin angin
e. Energi listrik → motor listrik

Tabel 2.1 Contoh Spesifik Mesin Penggerak Mula

Sumber Energi	Mesin Penggerak Mula	Contoh Aplikasi
Bensin	Mesin bensin 4 tak	Mobil, motor
Solar	Mesin diesel	Truk, kapal, genset
Uap air	Turbin uap	PLTU
Air sungai	Turbin air	PLTA
Angin	Turbin angin	PLTB
Listrik	Motor listrik	Pompa, *conveyor*

Prinsip umum mesin penggerak mula:

1. Mengambil energi sumber (bahan bakar dibakar atau fluida dimanfaatkan).
2. Mengubah energi menjadi tenaga gerak (putaran poros).
3. Menyalurkan tenaga mekanik ini ke mesin kerja, misalnya pompa air, generator listrik, atau kendaraan.

Jenis-jenis mesin penggerak mula secara umum dibagi menjadi dua kelompok besar:

Mesin Pembakaran Dalam (*Internal Combustion Engine* / ICE)

Pembakaran bahan bakar terjadi di dalam ruang bakar mesin itu sendiri (Tullah *et al*., 2020). Mesin pembakaran dalam ditunjukkan pada Gambar 2.1.

Contoh:

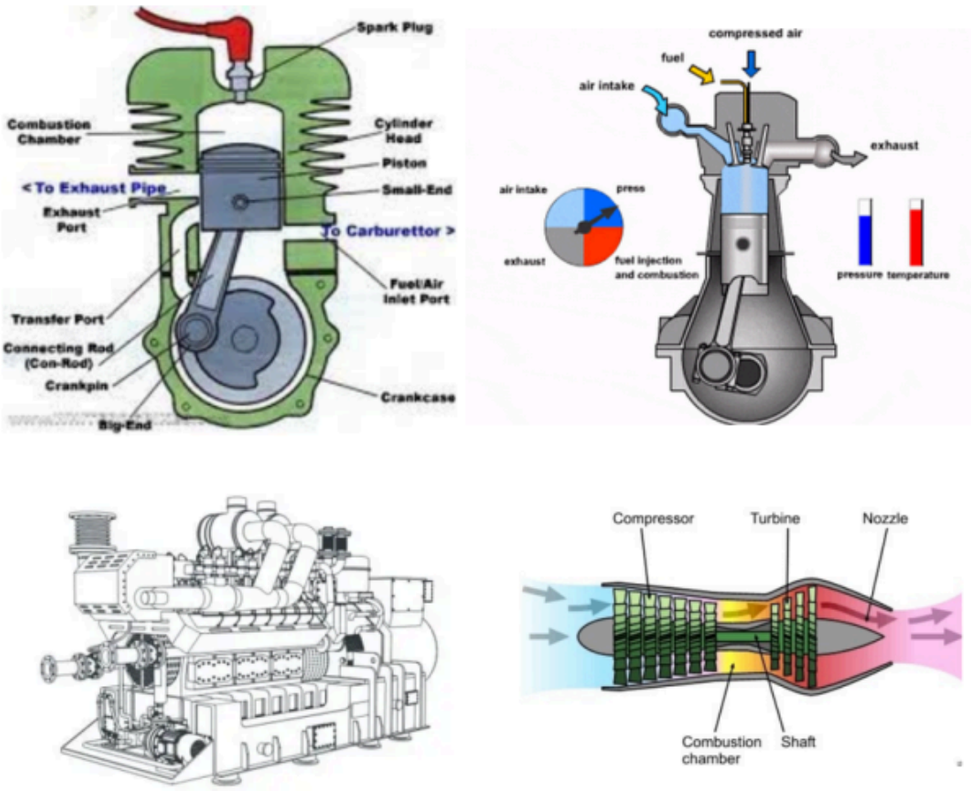
Mesin bensin (motor roda dua, mobil bensin); Mesin diesel (truk, kapal, genset); Mesin gas (industri); Mesin turbin gas (pesawat jet).

Keunggulan mesin pembakaran dalam:

a. Ringkas
b. Bisa dibawa bergerak (portabel)
c. Cepat mencapai putaran tinggi

Kelemahan mesin pembakaran dalam:

a. Polusi gas buang
b. Butuh bahan bakar fosil



Gambar 2.1 Mesin pembakaran dalam.

Mesin Pembakaran Luar (*External Combustion Engine* / ECE)

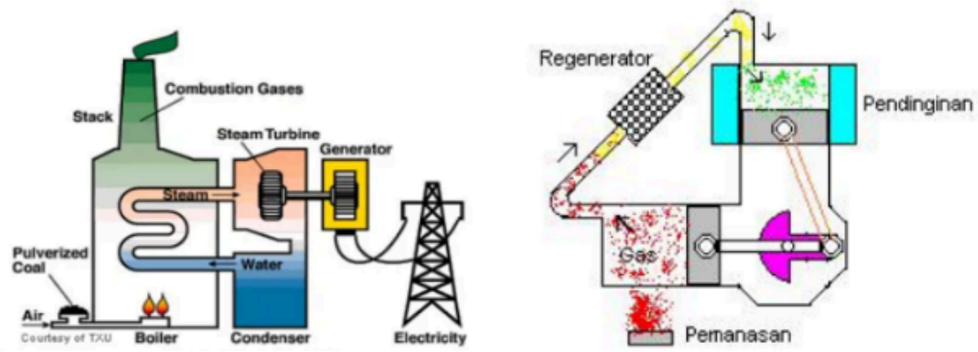
Pembakaran terjadi di luar mesin penggerak, energi panas baru diteruskan ke mesin kerja (Siregar *et al*., 2022). Mesin pembakaran luar ditunjukkan pada Gambar 2.2.

Contoh:

Turbin uap (pembangkit listrik tenaga uap); Mesin Stirling; Mesin uap piston lama (kereta api tua)

Keunggulan mesin pengbakaran luar:

a. Dapat memakai bahan bakar apa saja (batubara, kayu, gas)
b. Putaran relatif stabil
c. Kelemahan:
d. Ukuran besar
e. Proses start lama (butuh pemanasan dulu)





Gambar 2.2 Mesin pembakaran luar.

2.2 Elemen Transmisi Daya dan Putaran

Transmisi merupakan bagian dari sistem pemindah tenaga dari sebuah kendaraan, yaitu sistem yang berfungsi mengatur tingkat kecepatan dalam proses pemindahan tenaga dari sumber penggerak ke roda kendaraan (Tohasan *et al.*, 2024). Kendaraan yang berjalan pada jalan mendaki membutuhkan gaya dorong yang besar dengan putaran yang rendah sedangkan untuk kendaraan yang berjalan dengan kecepatan tinggi membutuhkan putaran yang tinggi tetapi gaya dorong yang tidak besar. Dengan kondisi tersebut maka diperlukan sistem transmisi agar kebutuhan tenaga yang berbeda pada tiap kondisi berkendara terpenuhi.

Sebelum merancang transmisi ada beberapa faktor utama yang perlu dipertimbangkan yaitu yang pertama adalah faktor ekonomi (mahal diproduksi atau tidak), yang kedua apakah desain rancangan transmisi memungkinkan diproduksi dengan teknologi pembentukan dan permesinan yang ada, dan menentukan parameter yang diinginkan sebagai karakteristik kendaraan seperti kecepatan maksimum, tanjakan maksimum yang dicapai, berat kendaraan (Achmad, 1999). Untuk penentuan rasio transmisi mengacu pada beberapa hal penting yaitu kemampuan output gaya traksi yang mampu mendorong kendaraan untuk bergerak sesuai parameter yang ditentukan, dan adanya ruang yang cukup untuk mekanisme transmisi contoh *gear* box yaitu *gear* yang ada di dalam box apakah memungkinkan untuk dibuat *gear* beda ukuran (Suriadi & Atmika, 2016).

Sistem Transmisi Roda Gigi (*Gear*)

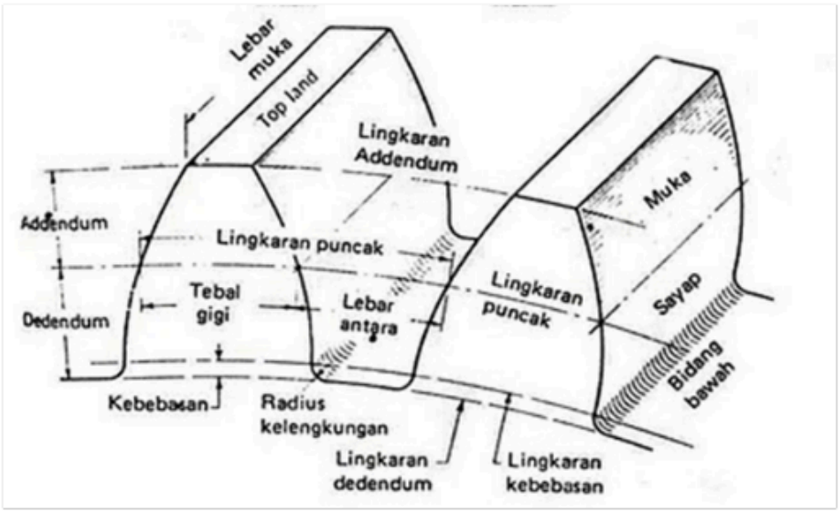


Gambar 2.3 Berbagai jenis sistem transmisi roda gigi.

Roda gigi digunakan untuk mentransmisikan daya besar dan putaran yang tepat serta jarak yang ralatif pendek (Supriadi, 2019). Roda gigi dapat berbentuk silinder atau kerucut. Transmisi roda gigi mempunyai keunggulan dibandingkan dengan sabuk atau rantai karena lebih ringkas, putaran lebih tinggi dan tepat, dan daya lebih besar (Wijanarko & Lufti, 2025). Kelebihan ini tidak selalu menyebabkan dipilihnya roda gigi di samping cara yang lain, karena memerlukan ketelitian yang lebih besar dalam pembuatan, pemasangan, maupun pemeliharaannya. Berbagai jenis sistem transmisi roda gigi ditunjukkan pada Gambar 2.3.

Involute Gear

Involute gear adalah roda gigi yang permukaan giginya dibentuk mengikuti kurva *involute* dari sebuah lingkaran dasar (*base circle*). Kurva *involute* adalah lintasan ujung tali yang tidak elastis saat digulung atau dilepaskan dari keliling lingkaran. Karena itu, *involute gear* sama dengan roda gigi yang gigi-giginya dibentuk dari garis involute lingkaran dasar (Aiyub *et al*., 2022).



Gambar 2.4 *Involut gear* .

Keuntungan *involute gear*:

a. Rasio kecepatan konstan → transmisi daya lebih halus.
b. Toleran pada variasi jarak sumbu → lebih fleksibel dalam pemasangan.

c. Produksi lebih mudah dan ekonomis → cocok untuk mass production.
d. Tidak perlu profil conjugate khusus untuk setiap pasangan roda gigi

Kekurangan *involute gear*:

a. Jika sudut tekanan terlalu kecil, gigi menjadi tipis di pangkal → mudah patah.
b. Pada beban sangat tinggi, tekanan pada garis kontak bisa menyebabkan keausan lebih cepat.
c. Untuk kecepatan sangat tinggi, bisa memerlukan modifikasi untuk mengurangi kebisingan dan getaran

Transmisi Roda Gigi Lurus

Transmisi roda gigi lurus, atau dikenal juga sebagai *spur gear*, adalah jenis transmisi daya yang paling sederhana dan umum digunakan. Roda gigi ini memiliki gigi yang lurus dan sejajar dengan sumbu putarnya, mentransmisikan gerakan rotasi antara dua poros yang sejajar (Irawan, 2016).

Konstruksi roda gigi lurus terdiri dari silinder atau cakram dengan gigi-gigi yang menonjol secara radial. Gigi-gigi ini dipotong lurus dan sejajar dengan sumbu putar roda gigi. Berfungsi untuk mentransmisikan daya dari satu poros ke poros lainnya, mengubah kecepatan putaran, dan mengubah arah putaran (Nugraha *et al*., 2024).



Gambar 2.5 Sistem transmisi roda gigi lurus.

Karakteristik Roda Gigi Lurus

Gigi-gigi berbentuk lurus dan dipasang paralel pada dua poros yang juga sejajar. Umumnya digunakan untuk mentransmisikan daya pada kecepatan rendah hingga sedang. Mudah dibuat dan

biaya produksi lebih murah. Menghasilkan suara lebih bising saat kecepatan tinggi, karena tumbukan antar gigi langsung.

Kelebihan Roda Gigi Lurus

Struktur sederhana & mudah dibuat, efisiensi tinggi (hingga sekitar 98%).

Cocok untuk jarak pendek antar poros.

Kekurangan Roda Gigi Lurus

Bising pada kecepatan tinggi, kurang cocok untuk putaran sangat cepat karena getaran tinggi.

Contoh penggunaan, Gear box sepeda motor, mesin cetak, mesin industri sederhana, jam mekanik tradisional.

Transmisi Roda Gigi Kerucut

Transmisi roda gigi kerucut (bevel gear) adalah sistem transmisi daya yang menggunakan roda gigi berbentuk kerucut untuk meneruskan putaran antara dua poros yang saling berpotongan, biasanya pada sudut 90 derajat (Nugraha *et al*., 2024). Roda gigi ini umum digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk pada sistem diferensial mobil.

Fungsi dan cara kerja dari roda gigi kerucut adalah dengan mentransmisikan daya dengan mengubah arah putaran poros yang saling bersilangan. Perubahan kecepatan dan torsi terjadi pada rasio gigi pada roda gigi kerucut dapat diatur untuk mengubah kecepatan dan torsi putaran, mirip dengan roda gigi lainnya.

Dalam sistem diferensial mobil, roda gigi kerucut memungkinkan roda belakang berputar pada kecepatan berbeda saat membelok, menjaga traksi dan stabilitas kendaraan. Roda gigi kerucut terbuat dari berbagai bahan seperti baja, dan memiliki gigi yang dirancang untuk berpasangan dan mentransmisikan daya dengan efisien

Jenis-jenis Roda Gigi Kerucut

Roda Gigi Kerucut Lurus

Gigi-gigi pada roda gigi ini lurus dan mengarah ke puncak kerucut (lihat Gambar 2.6). Roda gigi kerucut merupakan pasangan roda gigi yang digunakan untuk mentransmisikan daya dan putaran antara dua poros yang berpotongan, umumnya dengan sudut 90°. Bentuk giginya mengerucut sehingga memungkinkan perubahan arah gerak dengan efisien. Bevel gear banyak digunakan pada sistem transmisi mesin,

diferensial kendaraan, dan berbagai aplikasi mekanik yang membutuhkan perubahan arah putaran dengan torsi yang stabil.



Gambar 2.6 Roda gigi kerucut lurus (*bevel gear*).

Roda Gigi Kerucut Spiral



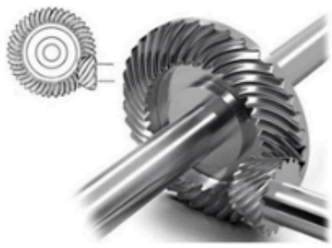
Gambar 2.7 Roda gigi kerucut spiral (*spiral bevel gear*).

Spiral bevel gear adalah jenis roda gigi kerucut yang memiliki gigi melengkung dan miring, sehingga kontak antar gigi lebih halus dibanding *bevel gear* lurus ditunjukkan pada Gambar 2.7. Desain ini membuat transmisi daya lebih efisien, mampu menahan beban torsi tinggi, serta menghasilkan kebisingan dan getaran yang lebih rendah. Spiral bevel gear banyak digunakan pada sistem transmisi kendaraan, diferensial mobil, dan mesin industri yang membutuhkan perubahan arah putaran dengan kecepatan tinggi dan kinerja yang stabil.

Roda Gigi Kerucut *Hypoid*

Roda gigi kerucut ditunjukkan pada Gambar 2.8, yaitu pasangan roda gigi yang digunakan untuk mentransmisikan daya antara dua poros yang berpotongan (umumnya pada sudut 90°). Roda gigi jenis ini memiliki bentuk kerucut dengan gigi-gigi yang tersusun radial dari

pusat ke tepi. Roda gigi ini digunakan pada sistem penggerak roda belakang, dan porosnya tidak berpotongan, mampu mengubah arah putaran serta mentransfer torsi dengan efisiensi tinggi. Roda gigi kerucut adalah komponen kunci pada sistem diferensial mobil.



Gambar 2.8 Roda gigi kerucut *hypoid*.

Roda Gigi Cacing (*Worm Gear*)



Gambar 2.9 Transmisi roda gigi cacing.

Sistem *worm gear* ditunjukkan pada Gambar 2.9, yaitu pasangan roda gigi yang terdiri dari *worm* (bentuk ulir) dan *worm wheel* (roda gigi). Mekanisme ini digunakan untuk transmisi daya dengan rasio reduksi yang sangat besar, serta mampu mentransfer putaran dengan arah sudut 90°. Keunggulan utamanya adalah mampu menghasilkan torsi besar dan dapat berfungsi sebagai *self-locking* (tidak bisa berputar balik). Umumnya dipakai pada mesin pengangkat, konveyor, dan aktuator.

Roda Gigi Dalam (*Internal Gear*)

Gambar 2.10 memperlihatkan internal gear, yaitu roda gigi dengan gigi berada di bagian dalam lingkaran. Internal *gear* bekerja dengan pasangan pinion di dalamnya untuk menghasilkan transmisi dengan arah putaran yang sama antara roda besar dan roda kecil. Sistem ini banyak digunakan pada planetary gear, sistem transmisi otomatis, dan

mekanisme mesin yang membutuhkan efisiensi tinggi dalam ruang terbatas.



Gambar 2.10 Transmisi roda gigi dalam.

Rack and Pinion (Rak dan Pinion)

Gambar 2.11 menunjukkan rack and pinion, yaitu kombinasi roda gigi silinder (*pinion*) dengan batang bergigi lurus (*rack*). Mekanisme ini mengubah gerak putar menjadi gerak lurus, atau sebaliknya. *Rack and pinion* sering digunakan pada sistem kemudi kendaraan, mesin perkakas, serta aktuator linear karena mampu menghasilkan gerakan translasi yang presisi dan efisien.



Gambar 2.11 Transmisi roda gigi rack pinion.

Pertimbangan Pemilihan

Rasio *Gear*

Pilih rasio yang sesuai dengan kebutuhan aplikasi untuk mencapai kecepatan dan torsi yang diinginkan.

Material

Pilih material yang sesuai dengan lingkungan operasional (misalnya, tahan korosi untuk lingkungan yang basah).

Akurasi *Gear*

Pilih tingkat akurasi yang sesuai untuk mengurangi kebisingan dan meningkatkan efisiensi.

Lebar Gigi

Pilih lebar gigi yang cukup untuk menangani beban yang diharapkan

Sistem Transmisi Sabuk - Puli

Transmisi sabuk adalah sistem transmisi tenaga/daya/momen puntir dari poros yang satu ke poros yang lain melalui sabuk (*belt*) yang melingkar/melilit pada puli yang terpasang pada poros-poros tersebut (Tohasan *et al.*, 2024). Karakter gesekan sabuk dan permukaan puli sangat mempengaruhi kemampuan transmisi. Jadi besarnya gaya tegang dalam sabuk menentukan besarnya momen puntir yang dapat ditransmisikan.

Keuntungan transmisi sabuk:

a. Pemindahan tenaga berlangsung secara elastik, maka tidak dibutuhkan kopling elastik.
b. Tidak berisik.
c. Dapat menerima dan meredam beban kejut.
d. Jarak poros tidak tertentu
e. Jarak poros yang lebih besar dapat dicapai.
f. Mudah dah murah dalam pembuatan.
g. Hanya memerlukan sedikit perawatan.

Kerugian transmisi sabuk:

a. Slip yang terjadi mengakibatkan rasio angka putaran tidak konstan.
b. Diukur dari besarnya tenaga yang ditransmisikan, sistem transmisi sabuk memerlukan dimensi/ukuran yang lebih besar dari sistem transmisi roda gigi atau rantai.

Sabuk V

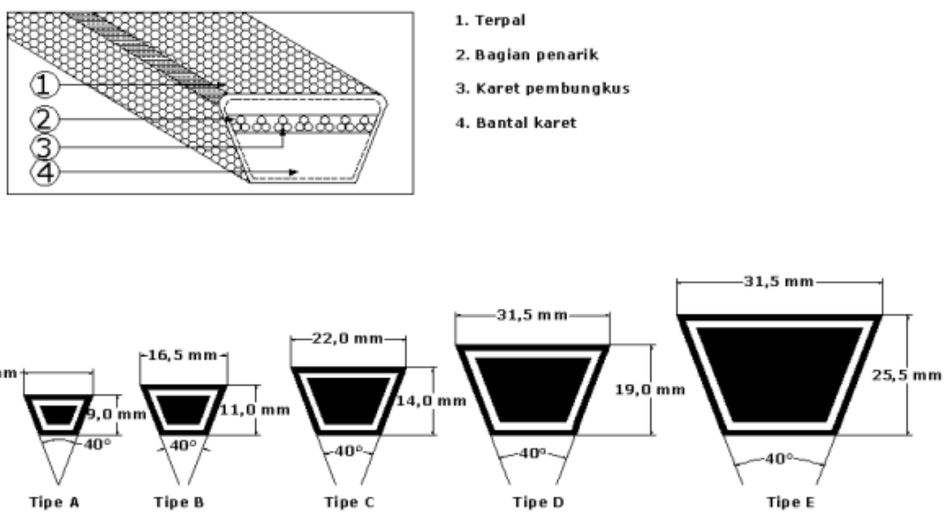
Jarak yang cukup jauh yang memisahkan antara dua buah poros mengakibatkan tidak memungkinkannya mengunakan transmisi langsung dengan roda gigi. Sabuk-V merupakan sebuah solusi yang dapat digunakan. Sabuk-V adalah salah satu transmisi penghubung yang terbuat dari karet dan mempunyai penampang trapesium (Choerullah *et al.*, 2022). Dalam penggunaannya sabuk-V dibelitkan

mengelilingi alur puli yang berbentuk V pula. Bagian sabuk yang membelit pada puli akan mengalami lengkungan sehingga lebar bagian dalamnya akan bertambah besar (Sularso, 2000).



Gambar 2.12 Transmisi sabuk V (*V belt*).

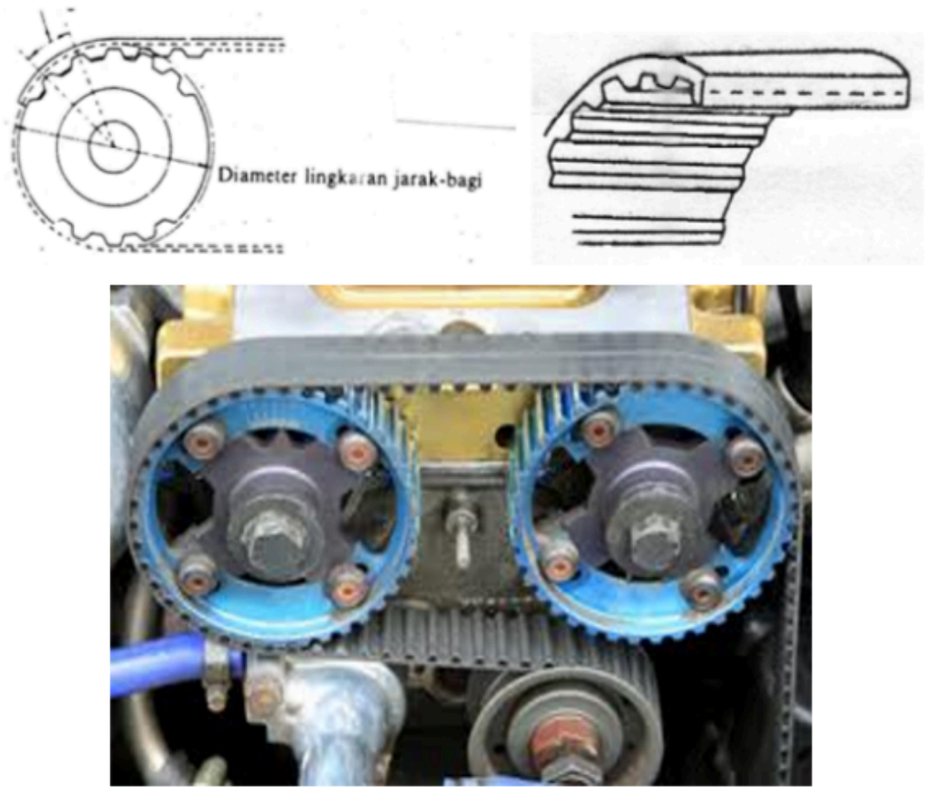
Sabuk-V banyak digunakan karena sabuk-V sangat mudah dalam penangananya dan murah harganya. Selain itu sabuk-V juga memiliki keungulan lain dimana sabuk-V akan menghasilhan transmisi daya yang besar pada tegangan yang relatif rendah serta jika dibandingkan dengan transmisi roda gigi dan rantai, sabuk-V bekerja lebih halus dan tak bersuara. Sabuk-V selain juga memiliki keungulan dibandingkan dengan transmisi-transmisi yang lain, sabuk-V juga memiliki kelemahan dimana sabuk-V dapat memungkinkan untuk terjadinya slip (Sochib & Putra, 2019; Tohasan *et al*., 2024).



Gambar 2.13 Tipe dan ukuran sabuk V.

Sabuk Gilir

Jarak yang jauh antara dua buah poros sering tidak memungkinkan transmisi langsung dengan roda gigi. Dalam hal demikian, cara transmisi putaran dan daya yang lain dapat diterapkan, dimana sebuah sabuk luwes dibelitkan pada puli. Transmisi sabuk bekerja atas dasar gesekan belitan. Untuk menghindari terjadinya slip antara puli dan sabuk maka dipergunakan sabuk gilir/gigi (*timing belt*). Sabuk gilir dibuat dari karet neoprene atau plastic poliuretan sebagai bahan cetak, dengan inti dari serat gelas atau kawat baja. Karena sabuk gilir dapat melakukan transmisi mengait seperti roda gigi atau rantai, maka gerakan dengan perbandingan putaran yang tepat dapat diperoleh (Ikram *et al*., 2024).



Gambar 2.14 Konstruksi sabuk gilir (*timing belt*).

Gambar 2.14 menunjukkan sistem transmisi sabuk gigi (*timing belt* dan *pulley*). Pada bagian atas tampak ilustrasi teknis berupa skema pulley dengan sabuk gigi yang memperlihatkan diameter lingkaran jarak-bagi serta bentuk profil gigi. Profil gigi ini dirancang agar sabuk dapat

menempel sempurna tanpa slip, sehingga putaran poros dapat ditransmisikan secara tepat. Pada bagian bawah gambar terlihat penerapan nyata pada mesin kendaraan, yaitu timing belt yang menghubungkan *camshaft* (noken as) dengan *crankshaft* (poros engkol). Fungsi utama sistem ini adalah mengatur sinkronisasi antara bukaan katup (*valve timing*) dengan gerakan piston, sehingga proses pemasukan campuran udara-bahan bakar dan pembuangan gas sisa pembakaran berlangsung dengan presisi.
Kelebihan penggunaan timing belt dibandingkan rantai (*timing chain*) adalah suara kerja yang lebih halus, bobot lebih ringan, dan biaya produksi lebih rendah. Namun, kelemahannya adalah usia pakai lebih pendek sehingga perlu perawatan serta penggantian berkala untuk menghindari kerusakan mesin.

Sabuk Rata

Sabuk penggerak datar memberikan fleksibel, menyerap hentakan, pemindahan kekuatan yang efisien pada kecepatan tinggi, tahan tehadap kikisan panas dan harganya murah. Selain itu sabuk datar ini juga dapat dipakai pada puli yang kecil. Kelemahan dari sabuk ini adalah karena sabuk ditentukan untuk tekanan yang tinggi, maka menyebabkan beban yang besar bagi batalan.

Tipe dari Sabuk Penggerak Datar

Sabuk terbuka

Sabuk terbuka digunakan untuk menghubungkan dua poros sejajar dan berputar dengan arah yang sama (Hidayat & Ramdani, 2024; Can & Isranuri, 2024). Pada mekanisme ini, sabuk dipasang tanpa menyilang sehingga puli penggerak dan puli yang digerakkan berputar searah.



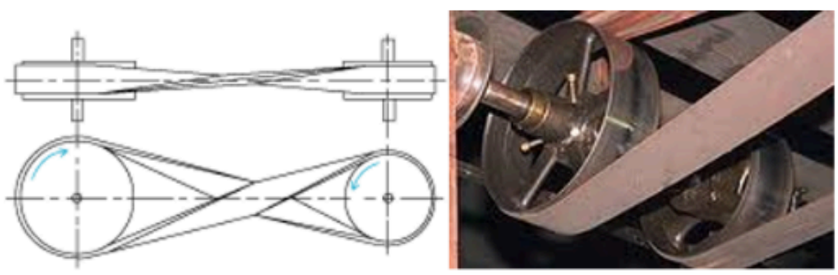
Gambar 2.15 Konstruksi sabuk rata terbuka (*open flat belt*).

Sabuk terbuka banyak digunakan pada mesin-mesin sederhana karena konstruksinya mudah, biaya rendah, dan perawatan relatif gampang, meskipun memiliki kelemahan berupa kemungkinan selip dan efisiensi yang lebih rendah dibanding transmisi roda gigi. Jika jarak diantara kedua sumbu besar, maka sisi kencang sabuk ditempatkan pada bagian bawah.

Sabuk silang

Sabuk silang adalah sistem transmisi daya yang menggunakan sabuk untuk menghubungkan dua puli dengan arah putaran yang berlawanan. Pada mekanisme ini, sabuk dipasang menyilang sehingga puli penggerak dan puli yang digerakkan berputar dengan arah berlawanan. Sabuk silang biasanya digunakan ketika dibutuhkan perubahan arah putaran pada mesin atau peralatan, serta memiliki keuntungan dalam menciptakan gesekan yang lebih baik dibanding sabuk terbuka, meskipun umur sabuk bisa lebih pendek karena adanya gesekan tambahan pada titik silang.

Sabuk silang digunakan untuk dua poros sejajar dengan putaran berlawanan arah. Untuk menghindari sobekan keausan, jarak kedua poros maksimum 20b, dimana b adalah lebar sabuk dengan kecepatan di bawah 15 (m/s2).



Gambar 2.16 Konstruksi sabuk rata silang (*cross flat belt*).

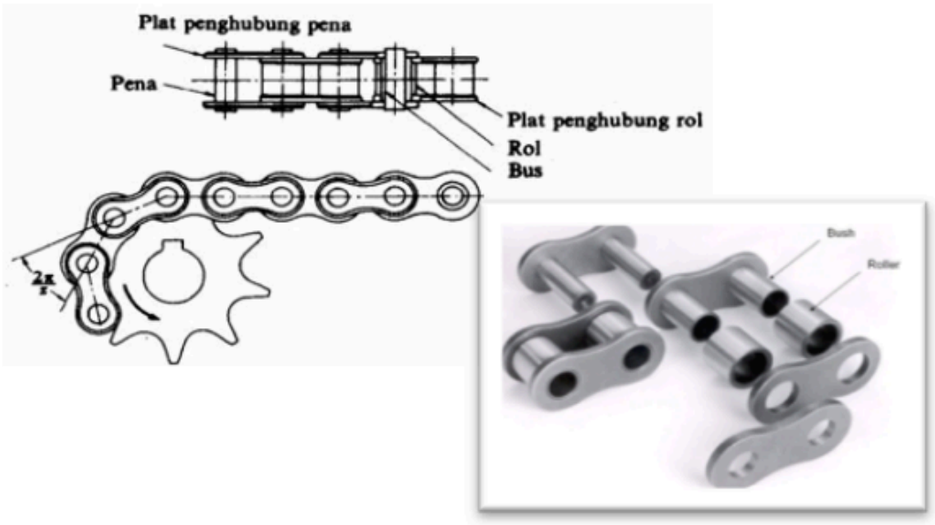
Sistem Transmisi Rantai - *Sproket*

Transmisi rantai-*sproket* digunakan untuk transmisi tenaga pada jarak sedang (Efrizal & Sabar, 2020). Sistem transmisi rantai–sproket adalah mekanisme pemindah daya yang menggunakan rantai dan roda gigi (sproket) sebagai penghubung. Rantai dipasang mengelilingi gigi-gigi

sproket sehingga tenaga dari poros penggerak dapat diteruskan ke poros yang digerakkan tanpa selip, berbeda dengan sistem sabuk. Kelebihan utama sistem ini adalah mampu mentransmisikan daya besar dengan kecepatan relatif tinggi serta menjaga sinkronisasi putaran. Kelemahannya adalah memerlukan pelumasan dan perawatan rutin untuk menghindari aus dan suara bising.



Gambar 2.17 Sistem transmisi rantai – *sproket*.



Gambar 2.18 Komponen rantai transmisi.

Kelebihan:

a. Transmisi tanpa *slip* → perbandingan putaran tetap
b. Dapat meneruskan daya besar
c. Keausan kecil pada bantalan
d. Jarak poros menengah (antara *belt* dan *gear*)

Kekurangan:

a. Tidak dapat dipakai utk kecepatan tinggi (max. 600 m/min)

b. Suara dan getaran tinggi
c. Perpanjangan rantai karena keausan pena dan bus

Jenis-Jenis Transmisi Rantai

Rantai *Roller (Roller Chain)*

Jenis paling umum, terdiri dari silinder (*roller*) kecil yang berputar di antara pelat. Banyak digunakan di sepeda motor, mesin industri, dan *conveyor*.



Gambar 2.19 Rantai *roller*.

Rantai rol terdiri dari beberapa bagian utama, yaitu *outer plate, inner plate, bearing pin, bush,* dan *roller*. *Pin* dan *bush* berfungsi sebagai engsel sehingga rantai dapat bergerak lentur mengikuti putaran *sprocket*. *Roller* ditempatkan di luar bush untuk mengurangi gesekan antara rantai dan gigi sprocket, sehingga meningkatkan efisiensi transmisi daya.

Rantai rol banyak digunakan pada sepeda, sepeda motor, mesin industri, hingga conveyor system karena mampu mentransmisikan daya besar dengan kecepatan putar yang tinggi dan ketahanan yang baik.

Kelebihannya adalah lebih kuat dan tidak mudah slip dibandingkan transmisi sabuk, namun memerlukan pelumasan serta perawatan rutin agar tidak cepat aus.

Rantai *Silent (Silent Chain atau Inverted Tooth Chain)*

Memiliki bentuk gigi yang saling mengunci dengan *sprocket*, sehingga lebih halus dan senyap. Cocok untuk mesin presisi seperti mesin industri dan mobil. Lebih tahan lama dan efisien, tapi lebih mahal.



Gambar 2.20 Rantai *Silent*.

Rantai Gigi (*Toothed Chain*)

Memiliki bentuk seperti sabuk bergerigi, tetapi berbahan logam. Digunakan dalam sistem timing pada mesin mobil (*timing chain*). Tidak memerlukan penggantian sesering *timing belt*.



Gambar 2.21 Rantai Gigi.

Rantai *Bush (Bush Chain)*

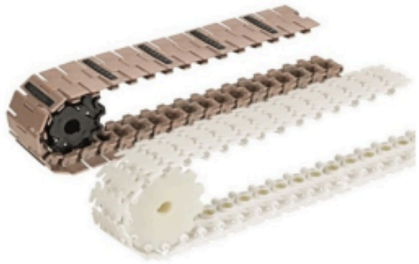
Mirip dengan *roller chain*, tetapi tanpa *roller*, hanya terdapat *bush* (bantalan) di antara link. Kurang efisien dibanding *roller* chain karena gesekan lebih tinggi.



Gambar 2.22 Rantai *bush*.

Rantai *Conveyor (Conveyor Chain)*

Gambar 2.23 menunjukkan rantai conveyor (conveyor chain), yaitu jenis rantai khusus yang digunakan pada sistem konveyor untuk memindahkan barang atau material secara kontinu.



Gambar 2.23 Rantai *Conveyor*.

Rantai conveyor biasanya terbuat dari bahan logam atau plastik rekayasa (*engineering plastic*) yang kuat dan tahan aus. Desainnya terdiri dari mata rantai yang saling terhubung dengan permukaan datar atau modul, sehingga mampu menopang beban saat bergerak di atas rel atau sprocket penggerak. Dirancang khusus untuk membawa beban, bukan hanya transmisi tenaga. Umumnya digunakan dalam industri (misal: pabrik makanan, logistik). Bentuk dan ukuran bisa disesuaikan.

Rantai *Leaf (Leaf Chain)*

Rantai leaf (*leaf chain*) adalah jenis rantai yang tersusun dari beberapa lembar plat logam (link plate) yang dihubungkan dengan pin, tanpa menggunakan *sproket* bergigi seperti rantai biasa. Rantai ini bekerja dengan cara dililitkan pada sheave (katrol halus) dan banyak dipakai pada mekanisme pengangkat beban, seperti *forklift, crane*, atau mesin press.

Keunggulan rantai leaf adalah memiliki kekuatan tarik tinggi, mampu menahan beban berat, serta konstruksinya sederhana. Namun, rantai ini tidak cocok untuk transmisi putaran berkecepatan tinggi.
Digunakan pada aplikasi *lifting* (pengangkatan), seperti *forklift*.
Tidak menggunakan sprocket biasa, tetapi lebih kepada tension dan *pulley*.



Gambar 2.24 Rantai *Leaf*.

Kopling (*Coupling*)

Kopling adalah suatu elemen mesin yang berfungsi untuk mentransmisikan daya dari poros penggerak (*driving shaft*) ke poros yang digerakkan (*driven shaft*), dimana putaran inputnya akan sama dengan putaran outputnya. Tanpa kopling, sulit untuk menggerakkan elemen mesin sebaik-baiknya. Dengan adanya kopling pemindahan daya dapat dilakukan dengan teratur dan seefisien mungkin (Soebyakto *et al.*, 2023).
Beberapa syarat yang harus dipenuhi oleh sebuah kopling adalah:

a. Mampu menahan adanya kelebihan beban.
b. Mengurangi getaran dari poros penggerak yang diakibatkan oleh gerakan dari elemen lain.
c. Mampu menjamin penyambungan dua poros atau lebih.
d. Mampu mencegah terjadinya beban kejut.

Untuk perencanaan sebuah kopling kita harus memperhatikan kondisi-kondisi sebagai berikut:

a. Kopling harus mudah dipasang dan dilepas
b. Kopling harus dapat mentransmisikan daya sepenuhnya dari poros
c. Kopling harus sederhana dan ringan
d. Kopling harus dapat mengurangi kesalahan hubungan pada poros

Kopling ditinjau dari cara kerjanya dapat dibedakan atas dua jenis:

a. Kopling Tetap
b. Kopling Tak Tetap (luwes/fleksibel)

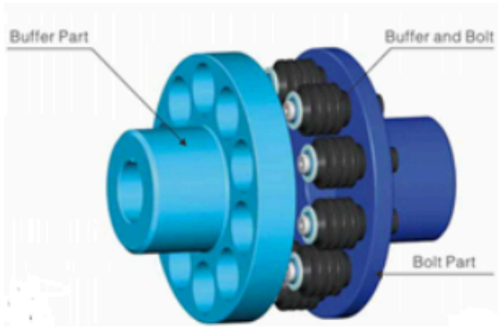
Kopling Tetap

Kopling tetap adalah suatu elemen mesin yang berfungsi sebagai penerus putaran dan daya dari poros penggerak ke poros yang digerakkan secara pasti (tanpa terjadi *slip*), dimana sumbu kedua poros tersebut terletak pada satu garis lurus atau dapat sedikit berbeda sumbunya. Kopling tetap selalu dalam keadaan terpasang, untuk memisahkannya harus dilakukan pembongkaran (Haris *et al.*, 2024).

Kopling tetap terbagi atas:

Kopling kaku

Kopling kaku dipergunakan bila kedua poros harus dihubungkan sumbu segaris, dan dipakai pada poros mesin dan transmisi umum di pabrik-pabrik.



Gambar 2.25 Kopling *Bush*.

Kopling bush (*bush coupling*) adalah jenis kopling kaku yang digunakan untuk menghubungkan dua poros dan mentransmisikan torsi, sambil menyerap getaran dan menyamakan sedikit ketidaksejajaran (misalignment) antara kedua poros. Kopling *bush* banyak digunakan pada mesin industri, pompa, dan sistem mekanik lainnya.

Kopling *Flens* Kaku

Kopling *flens* kaku adalah jenis kopling tetap yang digunakan untuk menghubungkan dua poros secara permanen dengan posisi yang

benar-benar sejajar tanpa adanya toleransi kelonggaran atau fleksibilitas (Nubly *et al*., 2017).

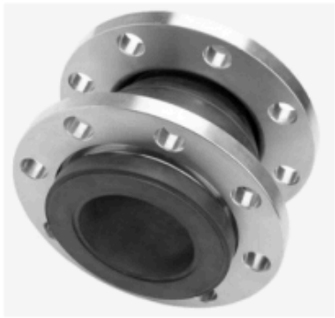
Kopling *flens* kaku terdiri atas dua buah *flens* (cakram berbentuk bundar) yang masing-masing dipasang pada ujung poros, kemudian kedua flens tersebut disatukan menggunakan baut atau pasak sehingga poros berputar sebagai satu kesatuan. Banyak digunakan pada mesin-mesin industri yang porosnya statis dan sejajar seperti pompa, kompresor, serta mesin konvensional di mana tidak terjadi perubahan posisi poros.



Gambar 2.26 Kopling *flens* kaku.

Kopling *Flens* Tempa

Kopling flens tempa adalah kopling jenis *flens* yang dibuat dengan proses penempaan (*forging*) sehingga memiliki kekuatan mekanis lebih tinggi dibanding flens cor atau las (Antonnius *et al*., 2022). Kopling ini digunakan untuk menghubungkan dua poros sejajar melalui *flens* berbaut dengan konstruksi yang kokoh dan tahan terhadap torsi besar. Banyak digunakan pada industri berat, pompa besar, turbin, kompresor, *rolling mill*, mesin dengan putaran tinggi dan beban kejut besar.



Gambar 2.27 Kopling *flens* tempa.

Kopling *Flens* Luwes

Kopling *flens* luwes adalah jenis kopling *flens* yang dilengkapi elemen fleksibel sehingga mampu menghubungkan dua poros dengan sedikit ketidaklurusan serta meredam getaran dan kejutan (Ruviana *et al*., 2025). Kopling ini digunakan bila dibutuhkan transmisi daya yang kuat sekaligus toleransi terhadap pergeseran poros, pada mesin industri dengan poros Panjang, pompa dan kompresor, turbin dan generator.

.



Gambar 2.28 Kopling *flens* luwes.

Kopling Tak Tetap (luwes/fleksibel)

Kopling tak tetap (fleksibel) dipergunakan bila kedua poros tidak selalu segaris dan memerlukan toleransi ketidaklurusan, serta dapat meredam getaran dan kejutan.
Memungkinkan adanya sedikit ketidaklurusan sumbu poros.

Kopling Karet Ban



Gambar 2.29 Kopling karet ban.

Kopling karet ban adalah jenis kopling fleksibel yang menggunakan elemen elastis berbentuk seperti ban karet sebagai peredam. Kopling ini berfungsi untuk menghubungkan dua poros sekaligus meredam getaran, kejutan torsi, serta mengurangi kebisingan selama transmisi daya. Digunakan pada mesin dengan getaran tinggi, seperti kompresor, pompa, dan *blower*.

Kopling Karet Bintang

Kopling karet bintang adalah jenis kopling fleksibel yang menggunakan elemen elastis berbentuk bintang (*star-shaped spider*) yang ditempatkan di antara dua hub (rumah kopling). Elemen karet bintang ini berfungsi sebagai peredam torsi, getaran, serta melindungi poros dan komponen mesin dari beban kejut.



Gambar 2.30 Kopling karet bintang.

Kopling Gigi

Kopling gigi adalah jenis kopling fleksibel yang menggunakan profil gigi pada hub (rumah kopling) yang saling berpasangan dengan gigi pada selongsong (*sleeve*) penghubung. Kopling ini mampu menyalurkan torsi besar sekaligus memberikan toleransi terhadap sedikit ketidaklurusan poros (aksial, radial, maupun angular).



Gambar 2.31 Kopling gigi.

Kopling Rantai

Kopling rantai adalah jenis kopling fleksibel yang menggunakan rantai rol (*roller chain*) sebagai elemen penghubung antara dua sproket yang dipasang pada ujung poros. Kopling ini dapat menyalurkan daya dengan baik sekaligus memberikan sedikit fleksibilitas terhadap ketidaklurusan poros (Efrizal & Sabar, 2020).



Gambar 2.32 Kopling rantai.

Kopling Universal

Kopling universal adalah jenis kopling fleksibel yang digunakan untuk menghubungkan dua poros yang tidak berada pada satu garis lurus, tetapi membentuk sudut tertentu, sehingga tetap dapat mentransmisikan daya dan putaran. Kopling ini sering disebut juga *Hooke's Joint* atau Universal *Joint* (U-*Joint*). Kopling universal digunakan bila kedua poros akan membentuk sudut yang cukup besar (Harahap et al., 2024).



Gambar 2.33 Kopling universal Hook.



Gambar 2.34 Kopling universal kecepatan tetap.

Kopling Fluida

Kopling fluida adalah jenis kopling fleksibel yang bekerja dengan menggunakan fluida (umumnya minyak) sebagai media perantara untuk mentransmisikan daya dari poros penggerak (*input*) ke poros yang digerakkan (*output*). Kopling ini tidak memiliki hubungan mekanis langsung antara kedua poros, melainkan memanfaatkan aliran fluida untuk memindahkan energi.



Gambar 2.35 Kopling fluida

2.3 Sistem Penggerak Mekanik

Sistem penggerak mekanik adalah sistem transmisi daya yang digunakan untuk memindahkan material atau mengolah bahan dengan bantuan mekanisme mekanis. Sistem penggerak mekanik mengubah energi rotasi menjadi gerakan translasi atau manipulasi bahan (Pangalinan & Yokasing, 2018).

Screw Conveyor

Konveyor ulir (disebut juga *screw conveyor*) adalah salah satu jenis sistem konveyor mekanis yang digunakan untuk memindahkan material secara horizontal, miring, atau bahkan vertical (Jafier, 2025). Prinsip kerjanya menggunakan ulir berputar (*helical screw blade*, biasa disebut *flight*) di dalam tabung atau *trough* (bak terbuka).



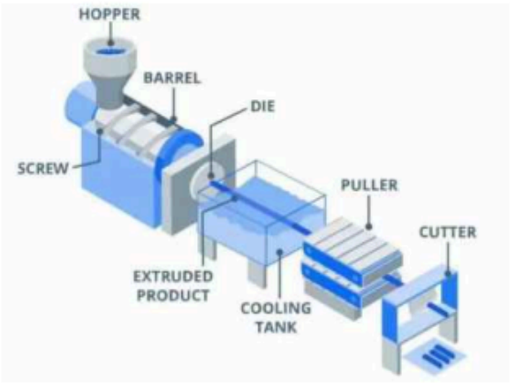
Gambar 2.36 *Screw Conveyor*

Cara kerja konveyor ulir adalah bahwa konveyor ini memiliki poros berulir (*screw*) yang berputar di dalam selongsong (tube) atau palung (*trough*). Saat *screw* berputar, material terdorong sepanjang alur ulir menuju ujung keluaran. Tidak seperti konveyor sabuk atau rantai, di sini material digerakkan oleh gaya dorong ulir (Sutisna, 2021).
Komponen utama konveyor ulir adalah:

Screw (helix / flight*):* bilah ulir yang memindahkan material.
Poros / *shaft*: tempat ulir dipasang.
Casing / *trough*: tabung atau bak sebagai jalur pergerakan material.
Drive unit: motor + gear box yang memutar *screw*.
Bearing (end & hanger bearing): menopang poros, terutama untuk konveyor panjang.

Aplikasi umum dari konveyor ulir adalah industri pangan (gula, tepung), industri semen & tambang (pindah pasir, semen), pengolahan limbah/*sludge* dan pertanian (pindah biji-bijian, pakan ternak).

Extruder



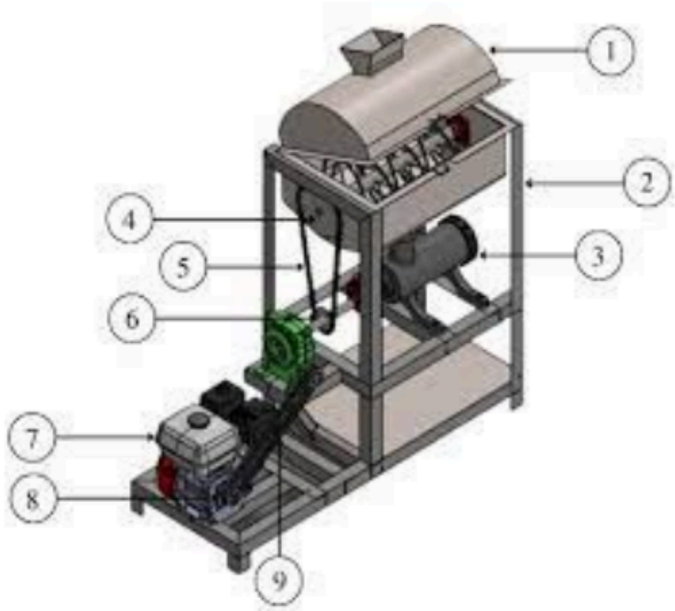
Gambar 2.37 Mesin extruder.

Mesin *extruder* adalah alat yang digunakan untuk mengolah dan membentuk berbagai jenis bahan makanan menjadi produk jadi dengan bentuk yang diinginkan (Sibarani et al., 2018). Proses kerja dari mesin extruder pun melibatkan beberapa tahapan, yakni: pertama, bahan mentah dimasukkan ke dalam *hopper*, yang kemudian dialirkan ke *barrel*. Di dalam barrel, bahan tersebut dipanaskan dan dicampur oleh sekrup (*screw*) yang berputar, sehingga bahan menjadi homogen dan siap dibentuk. Selanjutnya, bahan yang sudah diproses didorong melalui die atau cetakan untuk membentuk produk akhir. Setelah pembentukan, produk didinginkan untuk menstabilkan bentuknya (Nugroho & Tutuka, 2025).

Tabel 2.2 Komponen Mesin *Extruder*

Komponen	Fungsi Komponen
Hopper	Tempat bahan baku dimasukkan
Screw (ulir)	Mendorong dan menekan material di dalam barrel
Barrel	Silinder tempat screw berputar, biasanya dipanaskan
Die (cetakan)	Membentuk material menjadi produk bentuk tertentu
Cooling Tank	Mendinginkan produk hasil ekstrusi agar stabil
Puller	Menarik produk keluar dengan kecepatan konstan
Cutter	Memotong produk sesuai ukuran yang diinginkan

Kemampuan mesin *extruder* untuk mengolah berbagai material dan menghasilkan produk dengan bentuk dan ukuran yang konsisten membuat mesin *extruder* menjadi alat yang berguna dalam banyak industri makanan



Gambar 2.38 Ilustrasi diagram sistem *screw conveyor* dan *extruder* pada mesin cetak pakan. Bagian-bagiannya:

1. *Hopper* (corong pemasukan bahan) → tempat bahan baku dimasukkan ke dalam mesin.
2. Rangka mesin (*frame*) → penopang semua komponen mesin.
3. Motor listrik → sumber tenaga penggerak utama.
4. Puli (*pulley*) → roda yang menghubungkan motor dengan sabuk transmisi.
5. Sabuk (*belt*) → media transmisi daya dari motor ke poros.
6. *Gear box/reducer* → pengurang putaran dan penambah torsi.
7. Mesin bensin (*engine*) → sumber tenaga alternatif selain motor listrik.
8. Tangki bahan bakar → tempat penyimpanan bahan bakar untuk mesin bensin.

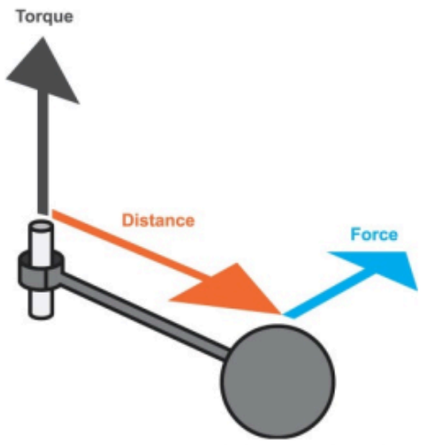
2.4 Analisis Torsi, Beban, dan Efisiensi Mekanik

Dalam sistem mekatronika, analisis torsi, beban, dan efisiensi mekanik menjadi aspek fundamental untuk memastikan kinerja aktuator,

motor, dan mekanisme transmisi daya dapat bekerja secara optimal. Torsi merupakan besaran yang menggambarkan kemampuan suatu aktuator atau motor untuk menghasilkan gaya puntir terhadap poros. Besaran ini sangat penting dalam menentukan kapasitas motor yang digunakan pada sistem mekatronika, misalnya pada robot, conveyor, atau aktuator linier. Beban yang bekerja pada sistem dapat berupa beban statis maupun dinamis, di mana keduanya memengaruhi distribusi gaya, kebutuhan energi, serta umur komponen. Analisis beban menjadi krusial agar sistem tidak mengalami overloading yang dapat menurunkan performa maupun menyebabkan kerusakan dini.
Selain itu, efisiensi mekanik adalah parameter yang menghubungkan daya masuk dengan daya keluaran suatu mekanisme. Kehilangan energi pada sistem mekanik biasanya disebabkan oleh gesekan, deformasi elastis, getaran, dan inersia beban. Dalam konteks mekatronika, efisiensi mekanik tidak hanya memengaruhi konsumsi energi, tetapi juga berhubungan langsung dengan presisi gerak, keandalan, dan stabilitas sistem.

Torsi (*Torque*)

Torsi dikenal sebagai momen gaya, adalah ukuran kecenderungan gaya untuk menyebabkan benda berputar pada sumbu tertentu. Dalam konteks mekanikal, torsi merujuk pada gaya putar yang dihasilkan oleh mesin untuk menggerakkan benda. Semakin besar torsi, semakin besar kemampuan mesin untuk menghasilkan putaran dan akselerasi, terutama saat membawa beban berat atau melewati tanjakan.



Gambar 2.39 Ilustrasi konsep torsi (*torque*) dalam mekanika.

Aspek utama tentang torsi:

1. Torsi adalah gaya yang menyebabkan benda berputar pada suatu sumbu.
2. Satuan torsi diukur dalam Newton-meter (Nm).
3. Faktor yang mempengaruhi torsi dipengaruhi oleh gaya yang diberikan dan jarak dari sumbu putar ke titik aplikasi gaya.

Pentingnya dalam kendaraan, torsi adalah faktor penting dalam kinerja mesin, terutama untuk akselerasi dan kemampuan menanjak.
Torsi adalah ukuran gaya putar, sedangkan tenaga (horsepower) adalah ukuran kerja yang dilakukan mesin per satuan waktu. Keduanya saling terkait, namun torsi lebih berfokus pada kemampuan mesin untuk menghasilkan putaran, sedangkan tenaga lebih berfokus pada kecepatan mesin. Perhitungan torsi diperlukan untuk menentukan spesifikasi motor dan transmisi.
Secara matematis,

$$T = F \; x \; r$$

dimana,
T = Torsi (Newton meter, Nm)
F = Gaya (Newton, N)
r = Jarak lengan momen (meter, m), yaitu jarak tegak lurus dari sumbu putar ke arah gaya.

Beban (*Load*)

Beban statis adalah beban yang nilainya konstan atau berubah sangat lambat terhadap waktu. Contohnya adalah berat suatu benda yang ditopang oleh aktuator atau rangka mekanik. Beban ini menghasilkan tegangan dan deformasi yang relatif tetap pada komponen. Jika beban statis tidak diperhitungkan dengan baik, komponen dapat mengalami kelelahan material (fatigue jangka panjang) atau bahkan kegagalan struktural.
Beban dinamis adalah beban yang berubah-ubah terhadap waktu, baik dalam besar maupun arah. Beban ini menimbulkan gaya inersia, getaran, serta kejut (shock load) pada sistem. Jika tidak dianalisis dengan baik, beban dinamis dapat menimbulkan kelelahan material lebih cepat, gesekan berlebih, serta menurunkan efisiensi mekanik.

Efisiensi Mekanik

Efisiensi mekanis adalah perbandingan antara daya keluaran mekanis (output power) dengan daya masukan mekanis (input power) pada suatu sistem. Efisiensi ini menunjukkan seberapa besar energi yang benar-benar dimanfaatkan untuk menghasilkan kerja berguna dibandingkan dengan energi yang hilang akibat gesekan, getaran, deformasi, maupun rugi-rugi lain.

Secara matematis,

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \; x \; 100\%$$

dimana,

η = efisiensi mekanik (%)
P_{out} = daya keluaran (Watt)
P_{in} = daya masukan (Watt)

Faktor penyebab kerugian: gesekan, keausan, penyelarasan tidak tepat.

Contoh:

Jika *screw conveyor* mengangkut 10 kg bahan dengan kecepatan 0,5 m/s dan memerlukan gaya 50 N.

a. Torsi yang dibutuhkan

$$T = F \; x \; r = 50N \; x \; 01m = 5 \; Nm$$

b. Jika motor 100 W digunakan, dan efisiensi sistem 80%

$$P_{out} = \eta \; x \; P_{in} = 100 \; W \; x \; 80\% = 80 \; W$$

Daya mekanis pada sistem berputar dapat dihitung dari perkalian torsi dengan kecepatan sudut,

$$P = T \; x \; \omega$$

dengan,

ω = kecepatan sudut (rad/s)

Sehingga efisiensi mekanik,

$$\eta_m = \frac{T_{out} \; x \; \omega_{out}}{T_{in} \; x \; \omega_{in}} \; x \; 100\%$$

Pada sistem transmisi (Gear , Pulley, Belt), biasanya terjadi rugi-rugi gesekan dan slip. Maka efisiensi dapat dihitung,

$$\eta_m = \frac{T_{load}}{T_{motor}} \; x \; 100\%$$

atau

$$\eta_m = \frac{P_{keluaran}}{P_{motor}} \; x \; 100\%$$

2.5 Pemilihan Material dan Struktur Mesin

Pemilihan bahan penting untuk memastikan kekuatan, ketahanan, dan keawetan sistem.

Kriteria Pemilihan Material

Pemilihan material merupakan tahap penting untuk memastikan komponen mampu bekerja sesuai fungsinya. Secara umum, kriteria pemilihan material dapat dilihat dari beberapa faktor berikut:

a. Kekuatan tarik, tekan, dan kelelahan material.
b. Ketahanan korosi, keausan, dan suhu tinggi.
c. Biaya dan kemudahan manufaktur.

Tabel 2.3 Material Umum

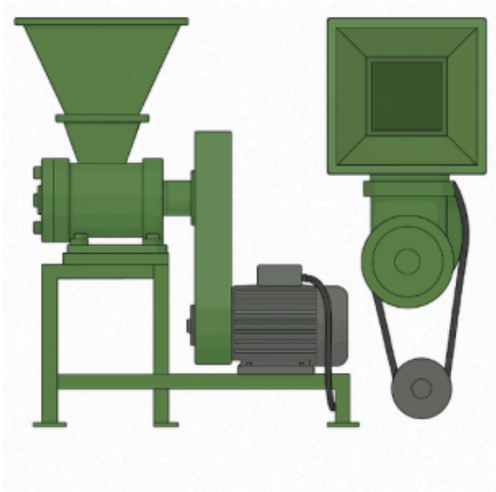
Komponen	Bahan Umum	Alasan Pemilihan
Rangka	Aluminium, Baja Ringan	Ringan, kuat, tahan lama
Poros	Baja karbon	Tahan torsi dan keausan
Gear	Nylon, kuningan	Ringan, tahan gesekan
Hopper	*Stainless steel*	Anti karat, *food grade*

Struktur Mesin

Struktur mesin merupakan bagian dasar yang berfungsi sebagai rangka penopang dan pengikat seluruh komponen agar dapat bekerja dengan baik. Desain struktur tidak hanya ditujukan untuk memberikan kekuatan dan kekakuan, tetapi juga harus memperhatikan aspek fungsionalitas, perawatan, serta kenyamanan

penggunaan. Oleh karena itu, dalam perancangannya terdapat beberapa kriteria penting yang perlu diperhatikan, antara lain:

a. Stabil dan minim getaran.
b. Modular untuk perawatan mudah.
c. Ergonomis bagi operator.



Gambar 2.40. Ilustrasi struktur rangka mesin cetak pakan tampak samping dan tampak atas menunjukkan pemilihan material dan sambungan rangka.

Gambar 2.40 memperlihatkan ilustrasi struktur rangka mesin cetak pakan. Pada tampak samping, terlihat rangka penopang utama yang berfungsi sebagai fondasi bagi komponen mesin, seperti *hopper*, ruang pencetak, motor penggerak, serta sistem transmisi sabuk-puli. Pemilihan material rangka umumnya menggunakan baja profil kotak atau besi siku karena memiliki kekuatan mekanis yang baik, tahan terhadap beban getaran, serta relatif mudah diperoleh dan dikerjakan dalam proses fabrikasi. Pada tampak atas, ditunjukkan tata letak komponen yang disusun secara simetris untuk menjaga distribusi beban agar merata pada rangka. Desain sambungan rangka biasanya menggunakan teknik pengelasan (*welding*) untuk menghasilkan ikatan permanen yang kokoh, meskipun pada beberapa bagian tertentu dapat dipertimbangkan penggunaan baut-mur agar memudahkan pembongkaran saat pemeliharaan. Penempatan motor penggerak yang terhubung dengan sistem puli dan sabuk ditempatkan sejajar dengan ruang pencetak untuk meminimalkan kehilangan energi mekanik.

3

SISTEM ELEKTRIK dan PENGGERAK MOTOR

Capaian Pembelajaran:

1. *Diharapkan mahasiswa mampu memahami prinsip kerja motor, perancangan rangkaian pengendali, serta integrasi motor dalam sistem mekatronika.*
2. *Diharapkan mahasiswa mampu mengimplementasikan motor dan kelistrikan dalam sistem mekatronika.*

3.1 Sistem Elektrik untuk Penggerak Motor

Sistem elektrik adalah rangkaian komponen yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik atau bentuk energi lain, sedangkan Penggerak Motor (*Motor Drive*) adalah subsistem yang mengontrol kinerja motor listrik (kecepatan, torsi, arah) sesuai kebutuhan aplikasi (Halim, 2025). Keduanya bekerja bersama untuk menggerakkan berbagai peralatan industri, otomasi, kendaraan listrik, dan perangkat elektronik. Sehingga sistem elektrik dan penggerak motor dapat diartikan sebagai sebuah integrasi antara sumber listrik, rangkaian kontrol, dan motor listrik untuk mengubah energi elektrik menjadi gerakan mekanik dengan presisi, efisiensi, dan keandalan tinggi (Aryza & Novelan, 2025).

Dalam industri, sistem elektrik dan penggerak motor menjadi dasar utama otomasi (*Nugroho & Pramito, 2025*), misalnya pada lengan robot yang menggunakan motor *servo* dengan kontrol PID, atau *conveyor belt* yang diatur oleh motor AC dengan VFD untuk menyesuaikan

kecepatan produksi. Tanpa sistem penggerak yang tepat, motor listrik hanya akan beroperasi pada kecepatan konstan. Penggunaan driver seperti H-*Bridge* (untuk DC) atau inverter (untuk AC) memungkinkan variasi kecepatan, reversibilitas, dan proteksi terhadap overload, sehingga meningkatkan fleksibilitas dan umur peralatan.

Dalam proses kerjanya, sistem elektrik sebagai penggerak motor memerlukan beberapa komponen utama (Aditya *et al*., 2019), yaitu:

Sumber Daya

Sumber daya ini digunakan sebagai *supply*, dapat berupa Tegangan AC maupun DC (contoh *supply* AC - PLN, generator, inverter, contoh supply DC - baterai, *rectifier*, *power supply*).

Kontroler

Kontroler dapat berupa Motor *Driver* yang berfungsi sebagai modul untuk mengatur arus/tegangan motor (contoh: ESC untuk BLDC dan VFD untuk AC), juga Mikrokontroler/PLC untuk memberikan sinyal control ke driver (contoh: Arduino, Rasberry Pi).

Sensor dan *Feedback*

Sensor dan *Feedback* sebagai sensing pada sistem dan pengiriman data untuk kemudian dikoreksi/disesuaikan dengan sistem yang diinginkan (contoh: *Encoder*, *tachometer*, atau sensor arus).

Protection

Penggerak dan sistemnya juga memerlukan proteksi sebagai pengaman saat sistem beroperasi (contoh: *Circuit breaker*, *fuse*, *thermal overload relay*).

Jenis Motor dan Penggeraknya

Motor listrik merupakan komponen utama dalam sistem mekatronika untuk mengubah energi listrik menjadi energi gerak (Nugroho & Norcahyo, 2024). Terdapat beberapa jenis motor yang umum digunakan, masing-masing dengan prinsip kerja dan aplikasi yang berbeda (Umam *et al*., 2017).

Motor DC (*Direct Current*)

Menggunakan arus searah. Memiliki keunggulan kontrol kecepatan yang baik. Prinsip kerja berdasarkan gaya Lorentz yang bekerja pada konduktor dalam medan magnet.

Motor AC (*Alternating Current*)

Menggunakan arus bolak-balik. Digunakan untuk aplikasi berdaya besar. Dibagi menjadi motor sinkron dan induksi.

Motor Stepper

Berputar dalam langkah tetap (*step*), sangat cocok untuk aplikasi presisi seperti printer 3D dan mesin CNC.

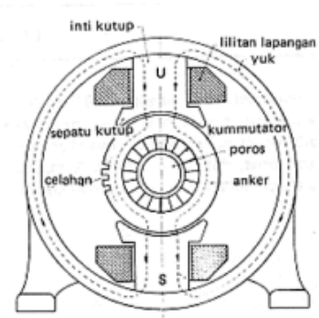
Motor Servo

Motor dengan sistem umpan balik (*feedback*). Mampu mengatur posisi, kecepatan, dan torsi secara presisi.

Motor Listrik DC *(Direct Current)*

Motor arus searah sebelum dikenal dengan motor arus bolak-balik (Motor DC) banyak digunakan untuk menghasilkan tenaga mekanik berupa kecepatan atau perputaran yang diimplementasikan pada mesin-mesin produksi di pabrik dan di industri. Selain itu, traksi dan tram listrik sebagai *start* awal dari mobil, dan rangkaian peralatan elektronik juga banyak menggunakan motor arus searah/DC. Berdasarkan karakteristiknya, motor arus searah ini mempunyai daerah pengaturan putaran yang luas dibandingkan dengan motor arus bolak balik/AC (Berahim, 1991).

Konstruksi motor DC terdiri dari tiga komponen utama, yaitu: Stator (magnet permanen atau elektromagnet), Rotor (kumparan berputar), dan Komutator dan sikat (*brush*) untuk membalik arah arus. Secara garis besar, konstruksi motor DC sama dengan konstruksi generator arus searah, hanya perbedaanya pada prinsip kerjanya, sehingga satu perangkat mesin arus searah dapat berfungsi sebagai generator maupun sebagai motor.

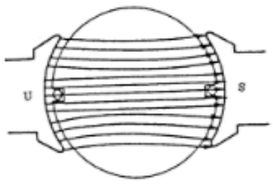


Gambar 3.1 Konstruksi Motor DC.

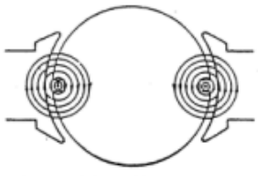
Melalui Gambar 3.1. dapat diketahui bagian yang penting dari motor DC adalah Bagian yang diam (stator), terdapat Badan (body) motor, Magnit, Sikat-sikat, Kerangka generator, Kutub-kutub utama beserta belitannya, dan Bantalan-bantalan poros. Sedangkan pada bagian yang berputar (rotor), terdapat rotor jangkar dan lilitannya, poros jangkar (*armature*), serta kumparan jangkar dan Inti jangkar (Berahim, 1991).

Prinsip Kerja Motor Arus Searah / DC

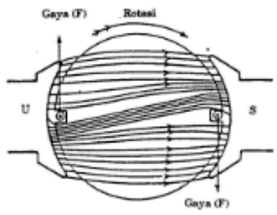
Motor DC bekerja berdasarkan prinsip gaya Lorentz, yaitu berdasarkan pada penghantar yang membawa arus ditempatkan dalam suatu medan magnet maka penghantar tersebut akan mengalami gaya. Gaya menimbulkan torsi yang akan menghasilkan rotasi mekanik sehingga motor akan berputar. Maka, motor arus DC ini menerima sumber arus searah dari jala-jala kemudian dirubah menjadi energi mekanik berupa perputaran yang nantinya dipakai oleh peralatan lain (Berahim, 1991). Pada dasarnya, prinsip kerja dari motor membutuhkan adanya garis-garis gaya medan magnet (fluks), antara kutub yang berada di stator. Penghantar yang dialiri arus ditempatkan pada jangkar yang berada dalam medan magnet. Pada penghantar timbul gaya yang menghasilkan torsi. Prinsip kerja motor arus searah/DC ini dapat diperhatikan dari Gambar 3.2a.



Gambar 3.2a Medan magnetik yang dihasilkan oleh kutub.



Gambar 3.2b Medan magnetik sebagai hasil arus yang mengalir pada penghantar.



Gambar 3.2c Interaksi kedua medan magnet dalam menghasilkan gaya.

Pada Gambar 3.2a. dapat dijelaskan bahwa garis-garis gaya medan magnet (*fluks*) dihasilkan oleh kutub-kutub magnet. Kemudian Penghantar yang dialiri arus akan menimbulkan medan magnit (garis-garis gaya fluks) pada penghantar seperti Gambar 3.2b. Interaksi dari kedua medan magnet, ditunjukkan pada Gambar 3.2a dan Gambar 3.1b, akan menimbulkan medan yang tidak seragam seperti Gambar 3.2c sehingga timbul gaya. Gaya tersebut menghasilkan torsi yang akan memutar jangkar.

Arah dari garis.garis gaya (*fluks*) medan magnet yang dihasilkan oleh kutub, arah arus yang mengalir pada penghantar dan arah dari gaya, saling tegak lurus (menurut hukum tangan kiri Fleming) (Berahim, 1991). Gaya yang dihasilkan oleh arus yang mengalir pada penghantar yang ditempatkan dalarn suatu medan magnet tergantung dari hal-hal berikut (Rianna *et al.*, 2023) :

a. Kekuatan dari medan magnet,
b. Besarnya nilai arus yang melalui penghantar
c. Panjang kawat yang membawa arus.

Jenis Motor DC

Motor DC Seri

Prinsip kerja motor DC seri, kumparan medan (stator) dan kumparan jangkar (rotor) dihubungkan secara seri. Hal ini menyebabkan arus yang sama mengalir melalui kedua kumparan tersebut (Syamsuar *et al.*, 2011). Interaksi antara kedua medan magnet ini menghasilkan gaya putar pada rotor.

$$I_f = I_a$$

dimana

I_f = arus medan (*field current*)
I_a = arus jangkar (*armature current*)

$$V = E_a + I_a(R_a + R_f)$$

dimana

V = tegangan suplai (Volt)
E_a = GGL balik (Volt)
R_a = resistansi jangkar (Ohm)
R_f = resistansi kumparan medan seri (Ohm)

$$E_a = k\ \phi\ \omega$$

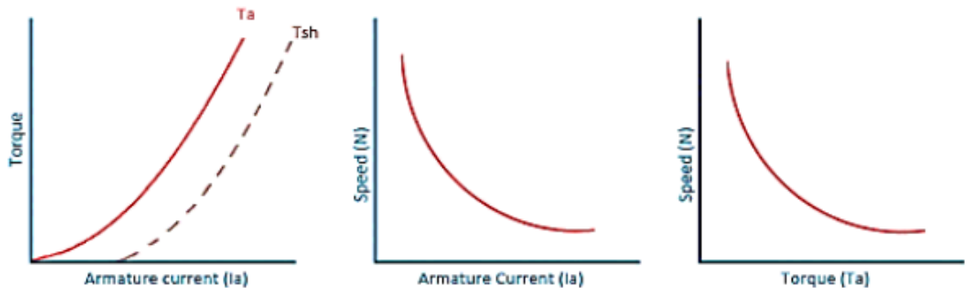
dimana

k = konstanta motor (tergantung desain)
ϕ = fluks magnet per kutub (Weber)
ω = kecepatan sudut rotor (rad/s)

$$T = k\ \phi\ I_a$$

dimana

T = torsi elektromagnetik (Nm)



Gambar 3.3 Ilustrasi grafik karakteristik motor DC Seri – Torsi vs Arus Jangkar, Kecepatan vs Arus Jangkar, Kecepatan vs Torsi.

Karakteristik motor DC Seri yaitu torsi awal sangat tinggi, cocok untuk aplikasi yang membutuhkan daya besar pada awal putaran, seperti derek, lift, dan kereta api. Karakteristik Motor DC Seri – Torsi vs Arus Jangkar, Kecepatan vs Arus Jangkar, Kecepatan vs Torsi, diperlihatkan pada Gambar 3.3 (Umam *et al*., 2021).

Karakteristik Torsi vs Arus Jangkar ($T - I_a$)

Karakteristik ini juga dikenal sebagai karakteristik Listrik. Torsi berbanding lurus dengan hasil kali arus jangkar dan fluks medan (Erari & Muslimin, 2021). Pada arus rendah $\phi \propto I_a$ maka $T \propto {I_a}^2$

(torsi naik sangat cepat). Oleh karena itu, kurva $T - I_a$ berbentuk parabola untuk nilai I_a yang lebih kecil. Setelah saturasi medan, ϕ konstan maka $T \propto I_a$ (linear).
$\propto$ adalah tanda proporsional terhadap, artinya berbanding lurus.
Torsi poros (T_{sh}) lebih kecil daripada torsi jangkar (T_a) karena rugi-rugi liar. Oleh karena itu, kurva T_{sh} vs I_a terletak sedikit lebih rendah.

Karakteristik Kecepatan vs Arus Jangkar ($N - I_a$)

Pengaruh beban terhadap kecepatan,

$$N = \frac{V - I_a(R_a + R_f)}{k\phi}$$

Beban naik maka I_a naik, maka ϕ naik, maka kecepatan N turun.
Beban turun maka I_a turun, maka ϕ turun, maka kecepatan N naik drastis.
Bahaya jika motor berputar tanpa beban karena dapat *overspeed*. Ketika arus jangkar sangat kecil kecepatannya menjadi sangat tinggi. Itulah sebabnya motor seri tidak boleh dihidupkan tanpa beban mekanis (Ibrahim *et al*., 2016).

Karakteristik Kecepatan vs Torsi ($N - T_a$)

Karakteristik ini juga disebut sebagai karakteristik mekanis.
Dari dua karakteristik motor seri DC di atas, dapat diketahui bahwa ketika kecepatan tinggi, torsi rendah dan sebaliknya.
Kelemahan motor DC Seri yaitu kecepatan motor sangat bergantung pada beban. Jika beban meningkat, kecepatan akan turun, dan sebaliknya (Nugroho & Agustina, 2015).

Motor DC Shunt

Prinsip kerja motor DC shunt, kumparan medan (stator) dihubungkan paralel (shunt) dengan kumparan jangkar (rotor) (Osman *et al*., 2022). Karena itu, tegangan pada kumparan medan sama dengan tegangan pada kumparan jangkar, namun arusnya berbeda.
Persamaan arus total,

$$I = I_a + I_f$$

dimana
I = arus total dari sumber (Ampere)

Persamaan tegangan jangkar,

$$V = E_a + I_a R_a$$

Arus medan,

$$I_f = \frac{V}{R_f}$$

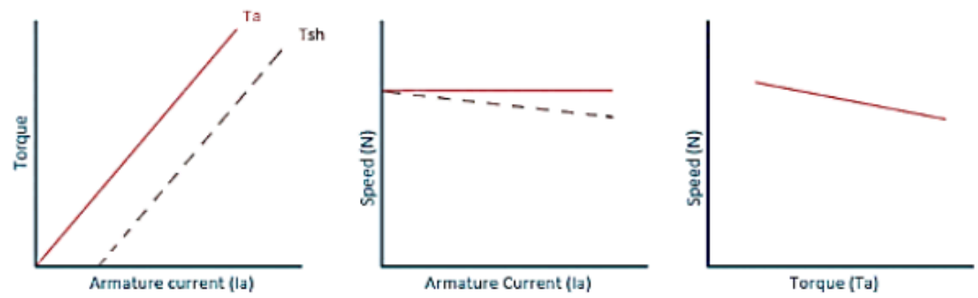
GGL balik,

$$E_a = k\,\phi\,\omega$$

Torsi elektromagnetik,

$$T = k\,\phi\,I_a$$

Karakteristik motor DC shunt yaitu kecepatan relatif stabil meskipun beban berubah-ubah. Cocok untuk aplikasi yang membutuhkan kecepatan konstan, seperti peralatan mesin dan konveyor.



Gambar 3.4 Grafik Karakteristik Motor DC Shunt – Torsi vs Arus Jangkar, Kecepatan vs Arus Jangkar, Kecepatan vs Torsi
Garis horizontal lurus menunjukkan karakteristik ideal dan karakteristik aktual ditunjukkan oleh garis putus-putus.

Karakteristik Torsi vs Arus Jangkar ($T - I_a$)

Dalam kasus motor shunt DC, kita dapat mengasumsikan fluks medan ϕ konstan. Meskipun pada beban berat, ϕ berkurang dalam jumlah kecil karena peningkatan reaksi jangkar. Karena kita mengabaikan perubahan fluks ϕ, kita dapat mengatakan bahwa torsi sebanding dengan arus jangkar. Oleh karena itu, karakteristik $T - I_a$ untuk motor shunt DC akan menjadi garis lurus melalui titik asal. Karena beban awal yang berat memerlukan arus awal yang besar, **motor shunt tidak boleh dihidupkan pada beban yang berat**.

Karakteristik Kecepatan vs. Arus Jangkar ($N - I_a$)

Karena fluks ϕ diasumsikan konstan, kita dapat mengatakan N ∝ Eb. Namun, karena emf balik juga hampir konstan, kecepatannya harus tetap konstan. Namun dalam praktiknya, ϕ dan Eb menurun seiring peningkatan beban. Emf balik Eb menurun sedikit lebih banyak daripada ϕ, oleh karena itu, kecepatannya sedikit menurun. Secara umum, kecepatannya hanya menurun sebesar 5 - 15% dari kecepatan beban penuh. Oleh karena itu, motor shunt dapat diasumsikan sebagai motor kecepatan konstan. Dalam karakteristik kecepatan vs. arus jangkar pada Gambar 3.4, garis horizontal lurus menunjukkan karakteristik ideal dan karakteristik aktual ditunjukkan oleh garis putus-putus.

Kelemahan motor DC shunt yaitu torsi awal lebih rendah dibandingkan motor DC seri. Kurang cocok untuk aplikasi yang memerlukan torsi awal besar, misalnya derek atau lokomotif. Sensitif terhadap perubahan tegangan suplai (tegangan turun → kecepatan turun).

Motor DC *Compound*

Prinsip kerja motor DC compound, menggabungkan karakteristik motor seri dan shunt. Memiliki dua kumparan medan: satu seri dan satu shunt (Li & Ma, 2020). Kombinasi ini menghasilkan karakteristik torsi yang baik dan kecepatan yang relatif stabil.

Persamaan tegangan,

$$V = E_a + I_a R_a + I_a R_{se}$$

dimana

R_{se} = Resistansi lilitan medan seri (Ohm)

Arus medan shunt,

$$I_{sh} = \frac{V}{R_{sh}}$$

dimana

I_{sh} = arus lilitan medan shunt (Ampere)

R_{sh} = resistansi lilitan medan shunt (Ohm)

Arus total,

$$I_{total} = I_a + I_{sh}$$

Fluks total (*Cumulative*),

$$\phi_{total} = \phi_{sh} + \phi_{se}$$

GGL balik,

$$E_a = k\,\phi_{total}\,\omega$$

dimana

k = konstanta motor

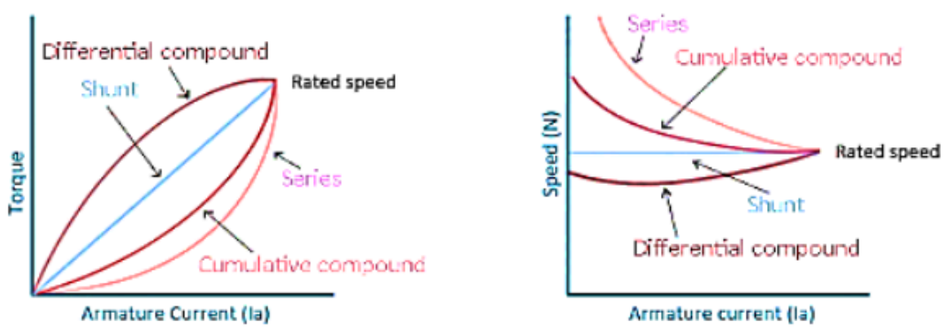
ω = kecepatan sudut rotor (rad/s)

Torsi Elektromagnetik

$$T = k\,\phi_{total}\,I_a$$

Karakteristik motor DC compound, torsi awal yang baik dan kecepatan yang relatif stabil. Aplikasi luas karena menggabungkan kelebihan motor seri dan shunt.

Kelemahan motor DC compound, lebih kompleks dari motor seri dan shunt.



Gambar 3.5 Grafik Karakteristik Motor DC *Coumpound* komulatif dan *Coumpound* diferensial.

Motor *Compound* Kumulatif (*Cumulative Compound*)

Motor kompon kumulatif digunakan jika karakteristik seri diperlukan tetapi beban cenderung dihilangkan sepenuhnya. Belitan seri menangani beban berat, sedangkan belitan shunt mencegah motor berjalan pada kecepatan tinggi yang berbahaya saat beban tiba-tiba dihilangkan. Motor ini umumnya menggunakan roda gila, di mana beban tiba-tiba dan sementara diterapkan seperti di pabrik penggilingan.

$$\phi_{total} = \phi_{shunt} + \phi_{seri}$$

Memberikan torsi awal besar dan kestabilan kecepatan.

Motor *Compound* Diferensial (*Differential Compound*)

Karena pada motor medan diferensial, fluks seri menentang fluks shunt, fluks total berkurang dengan peningkatan beban. Karena itu, kecepatannya tetap hampir konstan atau bahkan dapat meningkat sedikit dengan peningkatan beban ($N \propto E_b/\phi$). Motor kompon diferensial tidak umum digunakan, tetapi penggunaannya terbatas dalam pekerjaan eksperimental dan penelitian.

$$\phi_{total} = \phi_{shunt} - \phi_{seri}$$

Jarang digunakan karena karakteristik kecepatan yang tidak stabil.

Motor *Brushless* DC (BLDC)

Prinsip kerja motor *brushless* DC mirip dengan motor DC, tetapi tidak menggunakan sikat dan komutator mekanis. Motor BLDC menggunakan pengontrol elektronik untuk mengatur arus pada kumparan stator sehingga menghasilkan medan magnet putar yang menggerakkan rotor (Singh et al., 2018).

Tabel 3.1 Klasifikasi Motor DC (Syamsuar et al., 2011)

Jenis Motor DC	Ciri Khas	Aplikasi
Motor DC Shunt	Kumparan medan terhubung paralel dengan armature. Kecepatan relatif konstan.	Mesin bubut, *blower*
Motor DC Seri	Kumparan medan terhubung seri dengan armature. Torsi awal tinggi.	*Starter* mobil, traksi
Motor DC *Compound*	Gabungan Shunt dan Seri. Torsi bagus dan kecepatan lebih stabil dari Seri.	Elevator, *crane*
Separately Excited DC Motor	Kumparan medan diberi sumber daya terpisah. Kontrol kecepatan presisi.	Kendali presisi industri
Brushless DC (BLDC)	Tidak menggunakan sikat dan komutator, pakai kontrol elektronik.	*Drone*, mobil listrik

Pada Tabel 3.1, terlihat klasifikasi motor DC dengan masing masing ciri khasnya dan pengaplikasiannya. Hal ini dapat menjadi referensi penggunaan motor DC sesuai dengan penerapannya.

Karakteristik, Efisiensi tinggi, keandalan tinggi, umur panjang, dan kebisingan rendah.
Kelemahan, Biaya awal lebih tinggi dan sistem kontrol elektronik lebih kompleks.

Motor Listrik AC (*Alternating Current*)

Motor arus bolak-balik, yang biasa disebut motor AC, adalah jenis motor listrik yang menggunakan arus bolak-balik (AC) untuk menghasilkan gerakan mekanik (Anthony, 2020). Motor AC bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, di mana arus AC yang mengalir melalui kumparan menghasilkan medan magnet yang berputar, yang kemudian berinteraksi dengan rotor (bagian yang berputar) untuk menghasilkan gerakan. Umumnya, motor AC terdiri dari dua komponen utama yaitu stator dan rotor.

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya pada motor DC, stator adalah bagian yangdiam dan letaknya berada di luar. Stator mempunyai coil yang dialiri oleh arus listrik bolak balik dan nantinya akan menghasilkan medan magnet yang berputar. Bagian yang kedua yaitu rotor. rotor adalah bagian yang berputar dan letaknya berada di dalam (di sebelah dalam stator). Rotor bisa bergerak karena adanya torsi yang bekerja pada poros dimana torsi tersebut dihasilkan oleh medan magnet yang berputar (Hardani, 2018).
Motor AC dapat dikategorikan menjadi tipe satu atau tiga fase. Motor tiga fase memiliki keutamaan penggunaan pada konversi daya skala besar. Motor AC satu fase lebih cocok untuk penggunaan daya yang lebih kecil.

Prinsip Kerja Motor Arus AC

Motor AC beroperasi berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Ketika arus bolak-balik (AC) dialirkan melalui kumparan stator (bagian motor yang diam), akan dihasilkan medan magnet yang berputar (*rotating magnetic field*). Medan magnet yang berputar ini kemudian berinteraksi dengan rotor (bagian yang berputar) yang berada di dalam stator. Interaksi antara medan magnet putar stator dan rotor inilah yang menghasilkan gaya (*torque*) yang menyebabkan rotor berputar dan menghasilkan gerakan mekanik (Anthony, 2020).

Motor AC Sinkron

Motor sinkron adalah motor AC yang bekerja pada kecepatan tetap pada sistim frekwensi tertentu. Motor ini memerlukan arus searah (DC) untuk pembangkitan daya dan memiliki torque awal yang rendah, dan oleh karena itu motor sinkron cocok untuk penggunaan awal dengan beban rendah, seperti kompresor udara, perubahan frekwensi dan generator motor. Motor sinkron mampu untuk memperbaiki faktor daya sistem, sehingga sering digunakan pada sistem yang menggunakan bayank listrik.

Komponen Utama Motor Sinkron

Rotor

Perbedaan utama antara motor sinkron dengan motor induksi adalah bahwa rotor mesin sinkron berjalan pada kecepatan yang sama dengan perputaran medan magnet. Hal ini memungkinkan sebab medan magnit rotor tidak lagi terinduksi. Rotor memiliki magnet permanen atau arus DC-excited, yang dipaksa untuk mengunci pada posisi tertentu bila dihadapkan dengan medan magnet lainnya.

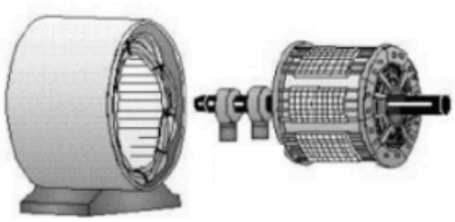
Stator

Stator menghasilkan medan magnet berputar yang sebanding dengan frekwensi yang dipasok.

Prinsip Kerja Motor AC Sinkron serupa dengan motor induksi pada mana keduanya mempunyai belitan stator yang menghasilkan medan putar. Tidak seperti motor induksi, motor sinkron dieksitasi oleh sebuah sumber tegangan DC di luar mesin dan karenanya membutuhkan *slip ring* dan sikat (*brush*) untuk memberikan arus kepada rotor. Pada motor sinkron, rotor terkunci dengan medan putar dan berputar dengan kecepatan sinkron. Jika motor sinkron dibebani ke titik dimana rotor ditarik keluar dari keserempakannya dengan medan putar, maka tidak ada torque yang dihasilkan, dan motor akan berhenti.

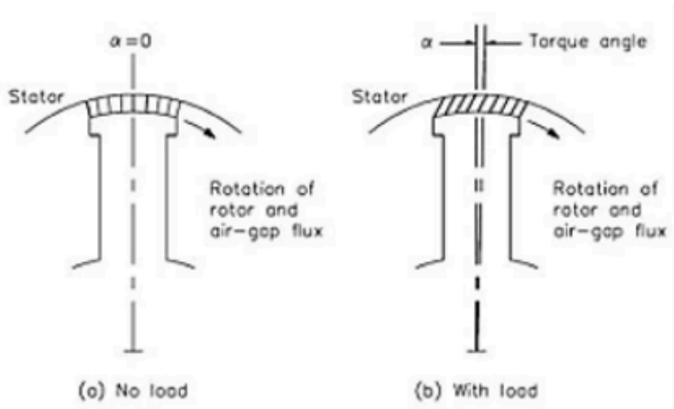
Motor sinkron tidak tergolong *self-starting* motor karena torsi hanya akan muncul ketika motor bekerja pada kecepatan sinkron; karenanya motor memerlukan peralatan untuk membawanya kepada kecepatan

sinkron. Motor sinkron menggunakan rotor belitan. Jenis ini mempunyai kumparan ditempatkan pada *slot* rotor. *Slipring* dan sikat digunakan mensuplai arus kepada rotor.



Gambar 3.6 Konstruksi Motor AC Sinkron.

Sebuah motor sinkron dapat dinyalakan oleh sebuah motor DC pada satu sumbu. Ketika motor mencapai kecepatan sinkron, arus AC diberikan kepada belitan stator (Yudha, 2020). Motor DC saat ini berfungsi sebagai generator DC dan memberikan eksitasi medan DC kepada rotor. Beban sekarang boleh diberikan kepada motor sinkron. Motor sinkron seringkali dinyalakan dengan menggunakan belitan sangkar tupai (*squirrel-cage*) yang dipasang di hadapan kutub rotor. Motor kemudian dinyalakan seperti halnya motor induksi hingga mencapai –95% kecepatan sinkron, saat mana arus searah diberikan, dan motor mencapai sinkronisasi. *Torque* yang diperlukan untuk menarik motor hingga mencapai sinkronisasi disebut *pull-in torque*.



Gambar 3.7 Sudut Torsi

Seperti diketahui, rotor motor sinkron terkunci dengan medan putar dan harus terus beroperasi pada kecepatan sinkron untuk semua keadaan beban. Selama kondisi tanpa beban (*noload*), garis tengah

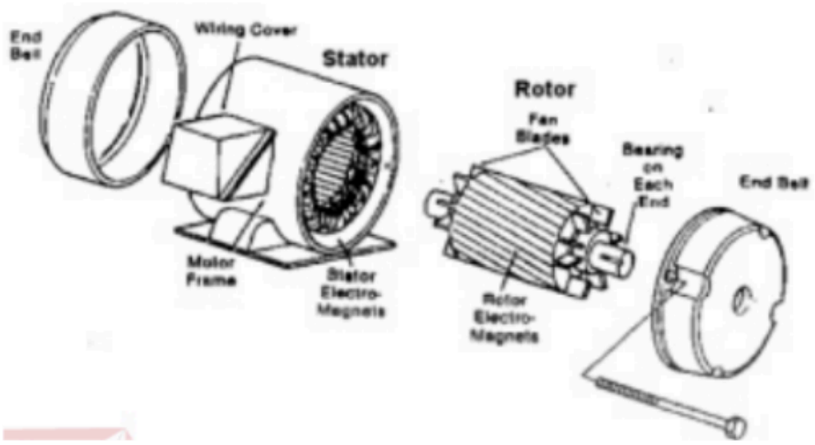
kutub medan putar dan kutub medan dc berada dalam satu garis (Gambar 3.7., bagian a). Seiring dengan pembebanan, ada pergeseran kutub rotor ke belakang, relative terhadap kutub stator (Gambar 3.7., bagian b). Tidak ada perubahan kecepatan. Sudut antara kutub rotor dan stator disebut sudut torque α (Yudha, 2020).

Jika beban mekanis pada motor dinaikkan ke titik dimana rotor ditarik keluar dari sinkronisasi $\varepsilon = 90°$, maka motor akan berhenti. Harga maksimum torque sehingga motor tetap bekerja tanpa kehilangan sinkronisasi disebut *pull-out torque* (Prastika et al., 2018).

Motor AC Asinkron/ Induksi

Motor induksi merupakan motor listrik arus bolak balik (AC) yang paling luas digunakan Penamaannya berasal dari kenyataan bahwa motor ini bekerja berdasarkan induksi medan magnet stator ke statornya, dimana arus rotor motor ini bukan diperoleh dari sumber tertentu, tetapi merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar (*rotating magneticfield*) yang dihasilkan oleh arus (Ambabunga, 2020).

Konstruksi Motor Induksi pada dasarnya mempunyai 3 bagian penting seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Konstruksi Motor AC *Asynchron* (Apripriharta, 2023)

Stator

Merupakan bagian yang diam dan mempunyai kumparan yang dapat menginduksikan medan elektromagnetik kepada kumparan rotornya.

Celah

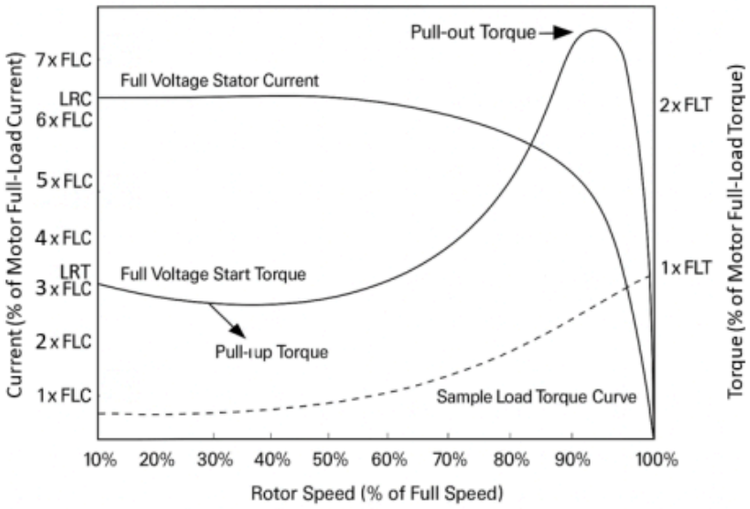
Merupakan celah udara: Tempat berpindahnya energi dari startor ke rotor.

Rotor

Mmerupakan bagian yang bergerak akibat adanya induksi magnet darikumparan stator yang diinduksikan kepada kumparan rotor.

Prinsip Kerja Motor Induksi berdasarkan induksi elektromagnetik dari kumparan stator kepada kumparan rotornya. Bila kumparan stator motor induksi 3-fasa yang dihubungkan dengan suatu sumber tegangan 3-fasa, maka kumparan stator akan menghasilkan medan magnet yang berputar. Garis-garis gaya fluks yang diinduksikan dari kumparan stator akan memotong kumparan rotornya sehinggat imbul emf (ggl) atau tegangan induksi. Karena penghantar (kumparan) rotor merupakan rangkaian yang tertutup, maka akan mengalir arus pada kumparan rotor. Penghantar (kumparan) rotor yang dialiri arus ini berada dalam garis gaya fluks yangberasal dari kumparan stator sehingga kumparan rotor akan mengalami gaya Lorentz yang menimbulkan torsi yang cenderung menggerakkan rotor sesuai dengan arah pergerakan medan induksi stator.

Medan putar pada stator tersebut akan memotong konduktor-konduktor pada rotor, sehingga terinduksi arus; dan sesuai dengan Hukum Lentz, rotor pun akan turut berputar mengikuti medan putar stator. Perbedaan putaran relatif antara stator dan rotor disebut slip (Manurung & Warman, 2013). Bertambahnya beban, akan memperbesar kopel motor yang oleh karenanya akan memperbesar pula arus induksi pada rotor, sehingga slip antara medan putar stator dan putaran rotor pun akan bertambah besar. Jadi, bila beban motor bertambah, putaran rotor cenderung menurun. Pada rangka stator terdapat kumparan stator yang ditempatkan pada slotslotnyayang dililitkan pada sejumlah kutup tertentu. Jumlah kutup ini menentukan kecepatan berputarnya medan stator yang terjadi yang diinduksikan ke rotornya. Makin besar jumlah kutup akan mengakibatkan makin kecilnya kecepatan putarmedan stator dan sebaliknya. Kecepatan berputarnya medan putar ini disebut kecepatan sinkron. Karakteristik Motor Induksi dapat dilihat dari grafik Torsi vs Kecepatan, pada Gambar 3.9.



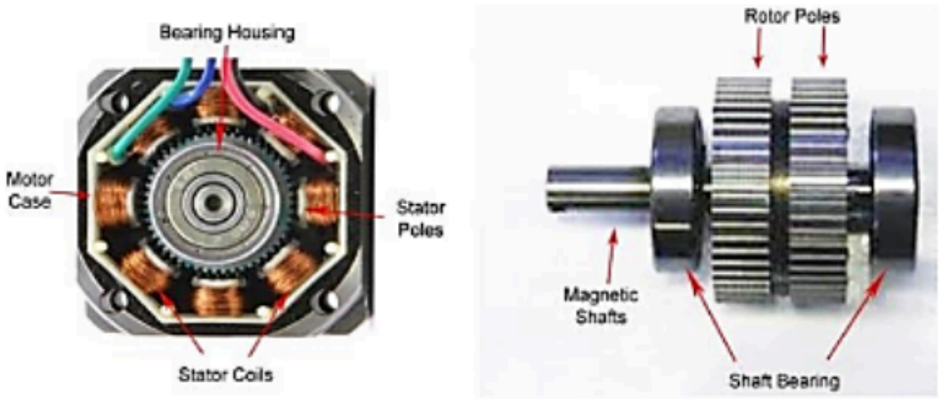
Gambar 3.9 Grafik Torsi-Kecepatan Motor AC Induksi. Torsi meningkat drastis saat kecepatan turun dari sinkron, maksimum pada saat start *(starting torque*), lalu turun saat mendekati kecepatan sinkron.

Motor Stepper

Motor stepper adalah jenis motor listrik yang mengubah sinyal listrik menjadi gerakan mekanis diskrit (*step by step*). Berbeda dengan motor DC biasa yang berputar terus-menerus, motor yang tidak menggunakan sikat (*brushless)* ini bergerak dalam *step angle* tertentu (misalnya 1.8° atau 0.9° per langkah), sehingga mampu mengontrol posisi dengan presisi tinggi tanpa memerlukan sistem umpan balik *(feedback*), meskipun beberapa aplikasi modern menggunakan *encoder* untuk akurasi lebih tinggi.

Motor stepper pada dasarnya adalah motor servo yang menggunakan metode motorisasi yang berbeda. Jika motor mencakup motor DC putaran kontinu dan rangkaian pengontrol gabungan, motor stepper memanfaatkan beberapa elektromagnet berlekuk yang disusun di sekitar peralatan pusat untuk menggambarkan posisi.
Pada Gambar 3.10.a. sebelah kiri adalah stator, diam dan menghasilkan medan magnet). Pada Gambar 3.10.b. sebelah kanan adalah rotor, berputar dan menghasilkan torsi/putaran.

Motor *stepper* memerlukan sirkuit kontrol eksterior untuk memberi energi pada masing-masing elektromagnet secara terpisah dan membuat poros motor berputar.



Gambar 3.10 Konstruksi Motor Stepper, a. Stator, b. Rotor.

Prinsip Kerja motor *Stepper*

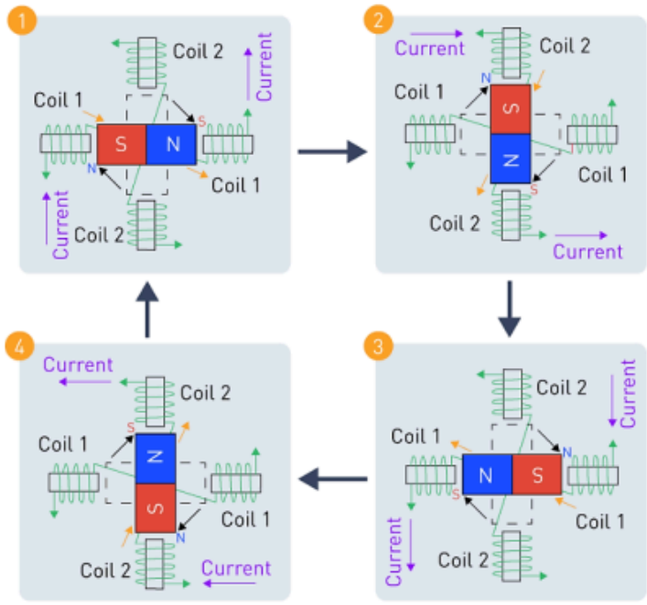
Motor *stepper* bekerja berdasarkan prinsip elektromagnetik. Ketika kumparan (*coil)* diberi arus listrik, ia menghasilkan medan magnet yang menarik atau menolak rotor (bagian yang berputar), sehingga rotor bergerak dalam langkah-langkah *(steps*) yang tetap. Motor stepper bergerak dalam langkah tetap (step angle) seperti 1.8°, 0.9°, atau 7.5° per langkah. Setiap langkah dikendalikan oleh pulsa listrik dari driver. Kecepatan dan arah putaran ditentukan oleh frekuensi dan urutan pulsa (Athani, 1997).

Motor *stepper* dioperasikan dengan mengaktifkan kumparan stator secara berurutan, seperti penjelasan berikut :

1. Driver mengirim sinyal listrik ke kumparan stator.
2. Medan magnet terbentuk, menarik rotor untuk sejajar dengan medan magnet stator.
3. Pulsa berikutnya mengaktifkan kumparan berikutnya, membuat rotor bergerak ke posisi baru.
4. Proses ini berulang, menghasilkan gerakan berputar atau linear yang terkendali.

Pada Gambar 3.11, dapat dilihat bahwa sistem pengoperasian dibuat menjadi empat bagian yang berbeda. Kumparan 1 dan Kumparan 2 adalah dua kumparan yang ada. Setiap kumparan tunggal dibagi

menjadi dua bagian yang berorientasi pada arah yang berlawanan. Pada awal proses, kumparan 1 dinyalakan, dan aliran arus akan dari kiri ke kanan. Terdapat medan magnet yang dibuat antara dua segmen kumparan 1, dan rotor magnet permanen akan berputar ke arah medan magnet ini. Medan magnet ini berorientasi pada arah tertentu, yang ditentukan oleh arah arus.



Gambar 3.11 Prinsip dasar pengoperasian motor stepper (Bianculli, 2009).

Pada tahap kedua, arus sekarang dialirkan melalui kumparan 2, yang menghasilkan pembentukan medan magnet untuk rotor, yang menyebabkan rotor berputar ke arah medan magnet. Langkah ketiga dan keempat termasuk mengulangi operasi ini, tetapi kali ini dengan arus yang mengalir ke arah lain. Keempat langkah tersebut mencakup rotasi penuh rotor, dan setiap langkah menyebabkan rotor berputar melalui 90 derajat penuh (Silaban et al., 2020).

Jenis Motor Stepper (Athani, 1997)

Motor Stepper Bipolar

Motor *stepper* dengan konfigurasi Stator Bipolar ini, di setiap fase stator pada motor stepper bipolar mencakup dua lilitan, dan arus dapat mengalir ke kedua arah melalui lilitan tersebut berkat desain bipolar. Karena konfigurasi ini, diperlukan mekanisme penggerak

yang lebih rumit. Mekanisme ini harus mampu membalikkan arah arus untuk mengubah kutub magnet, yang akan memungkinkan motor mengalami *stepper*. Pembalikan arus dilakukan dengan menggunakan sirkuit H-*bridge* untuk setiap fase, yang memungkinkan kontrol yang baik atas pergerakan motor.

Motor *bipolar* dibedakan berdasarkan torsi dan kapasitas kinerjanya yang tinggi, yang merupakan hasil langsung dari pemanfaatan semua lilitan secara efisien dalam produksi medan magnet yang kuat. Di sisi lain, karena sifat rumit dari rangkaian penggerak, motor *stepper bipolar* sering kali memerlukan pengontrol yang lebih rumit dan mahal.

Motor *Stepper Unipolar*

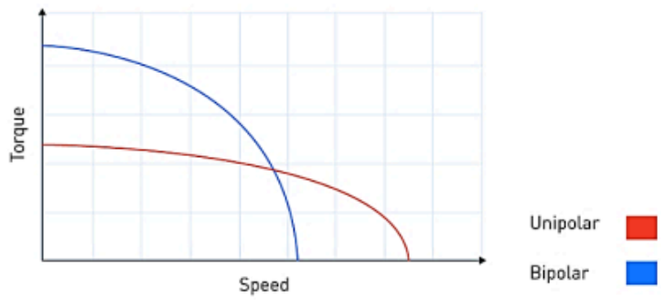
Motor *stepper unipolar* memiliki kemampuan untuk menyederhanakan mekanisme penggerak dengan memungkinkan arus mengalir melalui setiap lilitan hanya dalam satu arah. Hal ini dicapai dengan membagi setiap lilitan *fase* menjadi dua bagian yang sama, dengan keran tengah yang sama untuk setiap fase. Hal ini memungkinkan hasil yang diinginkan. Motor dioperasikan dengan mengaktifkan lilitan ini secara berurutan, yang menarik rotor agar sejajar dengan medan magnet yang dihasilkan oleh lilitan yang telah dipicu.

Tidak perlu menggunakan rangkaian H-*bridge* untuk membalikkan aliran arus pada motor unipolar, yang menghasilkan rangkaian kontrol yang tidak terlalu rumit dan lebih hemat biaya. Namun, kesederhanaan konstruksi ini mengorbankan torsi yang lebih sedikit jika dibandingkan dengan konfigurasi bipolar. Hal ini karena hanya setengah dari setiap lilitan fasa yang digunakan pada waktu tertentu.

Sejumlah pertimbangan seperti torsi yang dibutuhkan, kompleksitas kontrol, dan batasan biaya, diperhitungkan saat memutuskan antara topologi bipolar dan unipolar (lihat Gambar 3.12.). Karena torsi dan kinerjanya yang lebih tinggi, motor bipolar sangat cocok untuk aplikasi yang memerlukan kontrol yang presisi dan sejumlah besar tenaga penggerak. Beberapa contoh aplikasi tersebut meliputi mesin CNC dan komponen robotik. Di sisi lain, motor unipolar sering digunakan dalam aplikasi yang mengutamakan kesederhanaan, efektivitas biaya, dan kemudahan kontrol. Aplikasi seperti elektronik konsumen dan otomatisasi yang mudah adalah contoh dari aplikasi tersebut.

Tabel 3.2 Jenis Motor Stepper Berdasarkan Fasa (Patonra *et al*., 2020)

Jenis Motor	Jumlah Kawat	Kelebihan	Kekurangan
Unipolar	5 atau 6	Sederhana, mudah dikendalikan	Efisiensi rendah
Bipolar	4	Torsi lebih tinggi, efisien	Driver lebih kompleks



Gambar 3.12 Perbandingan karakteristik Kecepatan-Torsi pada motor stepper.

Motor Servo

Jenis motor listrik tertentu yang disebut motor servo dibuat untuk mengendalikan percepatan, kecepatan, dan posisi sudut atau linier secara tepat. Motor servo unik di antara jenis motor lainnya karena memiliki mekanisme kontrol umpan balik yang memungkinkannya untuk mengendalikan posisi secara tepat dalam sistem loop tertutup. Sistem ini terdiri dari motor itu sendiri, encoder atau perangkat umpan balik lainnya, dan pengontrol canggih yang terus-menerus memodifikasi keluaran motor sebagai respons terhadap sinyal umpan balik untuk mencapai dan mempertahankan posisi atau gerakan yang diinginkan.

Motor servo merupakan perangkat aktuator yang digunakan untuk mengontrol posisi, kecepatan, dan percepatan dengan presisi tinggi melalui sistem umpan balik (*feedback)*. Berbeda dengan motor stepper yang bergerak secara terbuka (*open-loop*), motor servo selalu bekerja dalam sistem tertutup *(closed-loop*) untuk memastikan akurasi Gerakan (Park & Won, 1991).

Komponen Motor Servo

Motor

Mirip dengan motor tradisional pada dasarnya, motor, komponen utama sistem servo, sering beroperasi secara tepat dan efektif pada kecepatan tinggi untuk mencapai akurasi yang lebih tinggi. Baik motor servo AC maupun DC memiliki keunggulan dalam hal efisiensi daya dan kontrol kecepatan, tergantung pada aplikasi tertentu.

Encoder

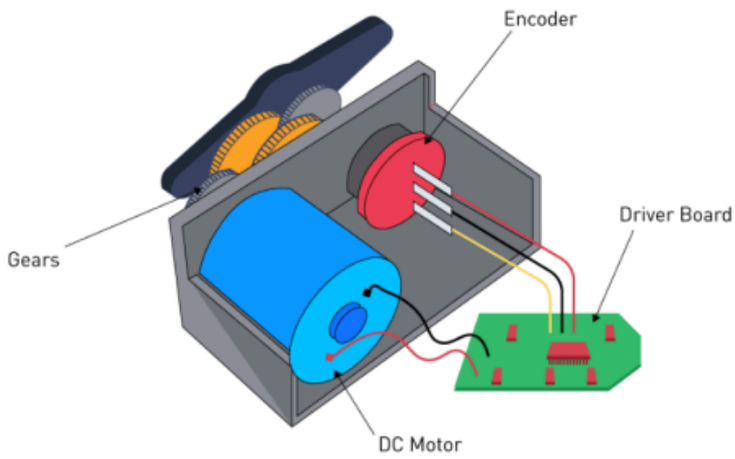
Encoder merupakan bagian penting dari sistem; ia menghasilkan sinyal yang menunjukkan sudut atau perpindahan poros motor untuk memberikan umpan balik pada posisi motor. Ada dua jenis encoder: inkremental, yang menyediakan data posisi relatif, dan absolut, yang menyediakan nilai posisi yang berbeda. Umpan balik ini menentukan kemampuan kontrol yang tepat dari sistem servo.

Driver

Setelah memproses masukan posisi encoder dengan pengontrol terintegrasi, rangkaian driver terus menggerakkan motor dalam loop umpan balik tertutup untuk mencapai posisi yang diperlukan.

Roda Gigi

Meskipun tidak diperlukan, motor servo sering kali memiliki roda gigi tambahan yang terpasang pada poros untuk mengurangi kecepatan putaran dan meningkatkan torsi keluaran motor.



Gambar 3.13 Komponen Motor Servo.

3.2 Rangkaian Pengendali Motor

Pengendalian motor listrik modern mengandalkan tiga komponen utama yang bekerja secara terintegrasi, yaitu driver motor, modulasi lebar pulsa (PWM), dan sistem proteksi. Ketiga elemen ini membentuk sistem kendali yang presisi, efisien, dan aman untuk berbagai aplikasi industri maupun komersial. Sistem kendali motor mencakup (Park & Won, 1991):

Driver Motor

Modul elektronik untuk mengatur tegangan dan arus ke motor. Contoh: H-Bridge untuk motor DC.

PWM (Pulse Width Modulation)

Teknik untuk mengontrol kecepatan motor dengan mengubah siklus kerja sinyal digital.

Proteksi Motor

Menghindari kerusakan akibat arus lebih, tegangan lebih, atau panas berlebih. Termasuk penggunaan fuse, thermistor, dan overcurrent relay.

Konsep Dasar Pengendalian Motor

Pengendalian motor listrik merupakan suatu sistem yang dirancang untuk mengatur kinerja motor secara presisi sesuai kebutuhan aplikasi. Sistem ini mencakup pengaturan kecepatan, arah putaran, torsi, serta perlindungan terhadap berbagai kondisi operasi yang tidak diinginkan (Naim, 2021).

Pada dasarnya, pengendalian motor bekerja melalui tiga prinsip utama. Pertama, sistem ini mengubah parameter listrik seperti tegangan dan frekuensi untuk mempengaruhi karakteristik mekanik motor. Kedua, sistem ini memanfaatkan umpan balik (feedback) untuk memastikan motor beroperasi sesuai setpoint yang diinginkan. Ketiga, sistem ini dilengkapi dengan berbagai mekanisme proteksi untuk menjamin keandalan dan keamanan operasi.

Terdapat beberapa pendekatan dasar dalam pengendalian motor (Achmad *et al*., 2025):

1. Pengendalian Kecepatan dapat dilakukan melalui variasi tegangan untuk motor DC, pengubahan frekuensi untuk motor

AC menggunakan VFD, modulasi lebar pulsa (PWM) untuk kontrol presisi.

2. Pengendalian Arah Putaran umumnya menggunakan konfigurasi H-bridge pada motor DC, pembalikan fasa pada motor AC tiga fase, sinyal pulsa dan arah pada motor stepper.
3. Pengendalian Torsi dilakukan dengan regulasi arus motor, sistem servo dengan *encoder* resolusi tinggi, algoritma kontrol vektor (*vector control*).
4. Proteksi dilakukan dengan proteksi terhadap *overcurrent*, proteksi terhadap *overtemperature*, proteksi terhadap *short circuit*.
5. *Feedback control* dilakukan dengan *encoder*, tachometer.

Sistem pengendalian modern seringkali mengintegrasikan berbagai sensor seperti *encoder*, *resolver*, atau *hall effect* sensor untuk menyediakan umpan balik posisi dan kecepatan secara real-time. Data ini kemudian diproses oleh kontroler (PLC, mikrokontroler, atau sistem khusus) untuk menyesuaikan output daya yang dikirim ke motor.

Driver Motor

Driver motor adalah rangkaian elektronik yang berfungsi sebagai antarmuka antara kontroler (seperti mikrokontroler atau PLC) dan motor. Modul elektronik ini dapat berfungsi sebagai pengatur tegangan dan arus ke motor, penguatkan sinyal kontrol dari mikrokontroler atau PLC, pengatur arah putaran, juga pengkonversi daya untuk motor.

Jenis Driver Motor

Driver Motor DC:

Menggunakan H-*Bridge* (contoh: IC L298N, TB6612FNG) untuk mengontrol arah putaran.

Driver Motor Stepper:

Menggunakan IC seperti A4988, DRV8825 (untuk control mikrostepping).

Memerlukan sinyal STEP & DIR dari mikrokontroler.

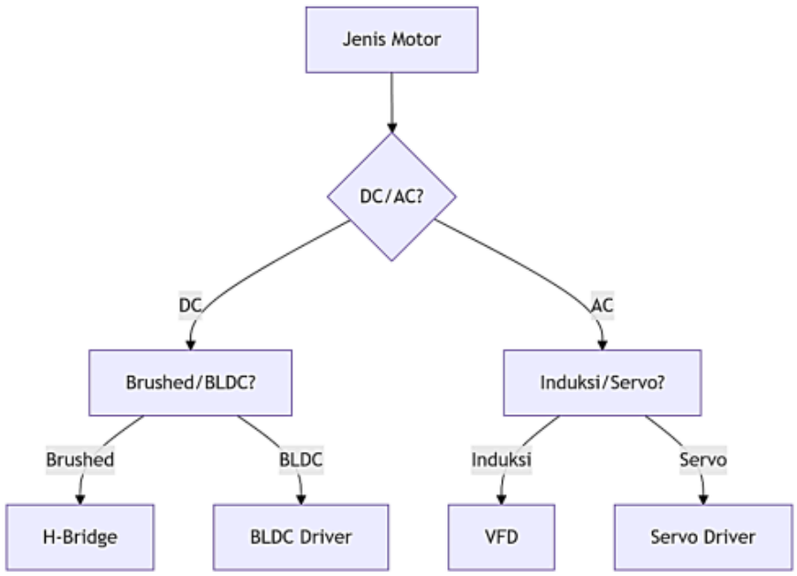
Driver Motor AC (VFD - Variable Frequency Drive):

Mengubah frekuensi dan tegangan input untuk mengontrol kecepatan motor induksi.

Untuk memudahkan pemilihan Driver motor seperti yang diinginkan, dapat mengikuti diagram alur (lihat Gambar 3.14) (Aditya *et al*., 2019). Tabel 3.3 memberikan panduan dasar untuk memilih driver motor yang sesuai dengan kebutuhan teknis dan anggaran. Untuk aplikasi khusus, selalu konsultasikan dengan spesialis sistem penggerak.

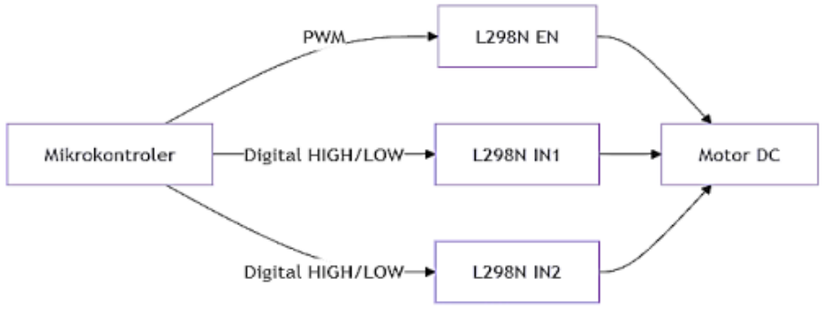
Tabel 3.3 Jenis dan Karakteristik Driver Motor

Jenis Driver	Motor yang Didukung	Contoh IC/Modul	Karakteristik
H-*Bridge* DC	Motor DC *Brushed*	L298N, TB6612FNG	Bisa kontrol arah, perlu PWM untuk speed control
Stepper Driver	Motor *Stepper*	A4988, DRV8825	Support mikrostepping, perlu pulsa STEP-DIR
VFD (*Variable Frequency Drive*)	Motor AC Induksi	Delta VFD-E series	Mengubah frekuensi AC, proteksi lengkap
Servo Driver	Motor *Servo*	MG996R driver	Menggunakan PWM posisi (50Hz, 1-2ms pulse)



Gambar 3.14 Diagram alur pemilihan *driver*.

Sebagai contoh, Diagram *driver* motor dasar sesuai klasifikasi motor, *Driver* Dasar Motor DC dengan H-*Bridge* (L298N).
Pengendalian motor DC secara efisien dapat dilakukan menggunakan modul H-*Bridge* L298N, yang memungkinkan kontrol arah dan kecepatan motor dengan presisi.
Lihat Gambar 3.15, modul L298N berfungsi sebagai jembatan H (H-*Bridge*), terdiri dari saklar elektronik (biasanya transistor atau MOSFET) yang diatur sedemikian rupa sehingga dapat membalik polaritas tegangan pada motor DC. Dengan mengaktifkan pasangan saklar secara bergantian, motor dapat berputar maju atau mundur, sedangkan PWM (*Pulse Width Modulation*) digunakan untuk mengatur kecepatannya (Jannah & Saifullah, 2024).



Gambar 3.15 Diagram driver dasar motor DC dengan H-*Bridge* (L298N).

Driver Dasar Motor Stepper (A4988)

Pengendalian motor stepper memerlukan driver khusus seperti A4988 yang mampu mengubah sinyal kontrol digital menjadi gerakan presisi. Berikut penjelasan lengkap mengenai diagram dan cara kerjanya:



Gambar 3.16 Diagram Driver Dasar Motor Stepper (A4988).

Prinsip dasar rangkaian seperti pada Gambar 3.16., modul A4988 berfungsi sebagai driver motor stepper bipolar yang mengatur aliran

arus ke empat kumparan motor melalui teknik microstepping. Driver ini menerima dua sinyal utama dari mikrokontroler (seperti Arduino), yaitu: Pulsa *STEP* – Setiap pulsa menghasilkan satu langkah motor dan Sinyal *DIR* – sebagai penentu arah putaran (*HIGH*/Maju, *LOW*/Mundur).

Kontrol PWM (*Pulse Width Modulation*)

PWM digunakan untuk mengatur kecepatan motor dengan mengubah *duty cycle* (lebar pulsa sinyal digital) (Baharuddin, 2012).

Prinsip Kerja PWM pada Motor

Semakin tinggi *duty cycle* (misal 80%), motor berputar lebih cepat.

a. Semakin rendah *duty cycle* (misal 20%), motor berputar lebih lambat.
b. Sinyal kotak dengan frekuensi tetap (500Hz-20kHz untuk motor).
c. Kecepatan motor ditentukan oleh *duty cycle* (0-100%).

Analisis pengaruh parameter PWM pada motor, terlihat pada Tabel 3.4.

Rangkaian Proteksi Motor

Pengoperasian motor listrik yang aman dan tahan lama memerlukan rangkaian proteksi yang dirancang untuk mendeteksi dan menangani berbagai kondisi abnormal (Sari et al., 2022). Rangkaian ini berfungsi melindungi motor dari kerusakan akibat masalah kelistrikan, termal, atau mekanis yang dapat terjadi selama operasi.

Prinsip Kerja Proteksi

Pada prinsipnya, rangkaian proteksi akan bekerja dalam tiga tahap, yaitu:

1. Deteksi, pada proses ini, sensor memantau parameter (arus, tegangan, suhu);
2. Pemrosesan, proses ini, kontroler (PLC, *microcontroller*) menganalisis data;
3. Aksi, pada proses ini sistem akan melakukan 3 opsi sesuai dengan kondisi yang diinginkan, yaitu *Trip, m*emutus daya *via*

contactor; *Throttling*, *m*engurangi kecepatan melalui PWM; *Alert*, *m*engaktifkan alarm/sinyal visual.

Jenis Proteksi Motor

Proteksi Arus (*Overcurrent Protection*)

Menggunakan fuse, *circuit breaker*, atau *current* sensor (ACS712).

Contoh: Jika arus motor melebihi *rating*, fuse putus atau *driver* mati.

Proteksi Tegangan (*Over/Under Voltage Protection*)

Menggunakan Zener diode, *voltage regulator*, atau *comparator* (LM393).

Proteksi Panas (*Thermal Protection*)

Sensor suhu (NTC thermistor, LM35) mematikan motor jika terlalu panas.

Proteksi *Short Circuit*

MOSFET dengan current *limiting* atau *polyfuse* (*resettable fuse*).

Flyback Diode (Anti-*Spike*)

Dioda (1N4007, Schottky) dipasang paralel dengan motor untuk menyerap tegangan balik (*back* EMF).

Gambar 3.17. menunjukkan contoh diagram rangkaian proteksi. Dengan implementasi aksi yang tepat, sistem proteksi tidak hanya mencegah kerusakan peralatan dan sistem, tetapi juga meningkatkan

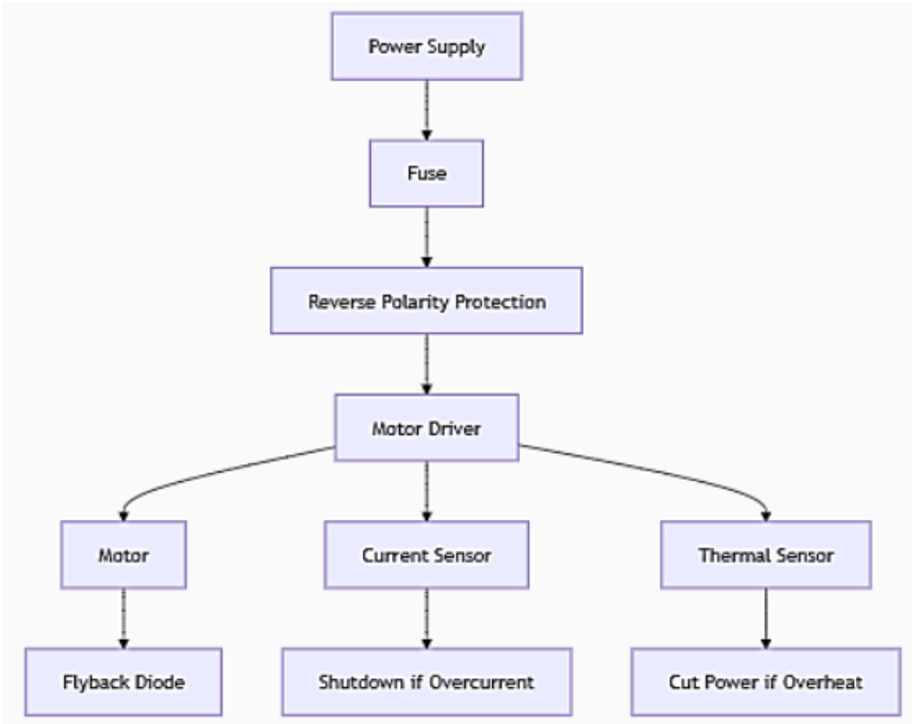
Tabel 3.5 Karakteristik Performa Sistem Kendali

Parameter	Driver DC	Driver Stepper	VFD AC
Presisi	Sedang	Sangat Tinggi	Tinggi
Biaya	Murah	Menengah	Mahal
Kompleksitas	Rendah	Sedang	Tinggi
Efisiensi	70-85%	60-75%	85-95%
Aplikasi	Robotik sederhana	CNC, 3D Printer	Industri besar

Dari Tabel 3.5., dapat ditunjukkan masing-masing karakteristik performa sistem kendali. Data tersebut dapat dijadikan pertimbangan dan acuan dalam pemilihan sistem kendalinya.

Tabel 3.4 Parameter PWM yang Mempengaruhi Motor

Parameter PWM	Deskripsi	Pengaruh pada Motor	Nilai Optimal
Frekuensi PWM	Jumlah siklus pulsa per detik (Hz)	- Frekuensi rendah (<1kHz) menyebabkan motor berdengung dan panas. - Frekuensi tinggi (>20kHz) mengurangi noise tetapi meningkat-kan switching loss.	5kHz-20kHz (motor DC/ Stepper) 1kHz-5kHz (motor besar)
Duty Cycle	Persentase waktu sinyal "ON" dalam satu periode PWM (0-100%)	- Duty Cycle 0%: Motor berhenti. - Duty Cycle 50%: Kecepatan setengah. - Duty Cycle 100%: Kecepatan maksimum.	Disesuaikan dengan kebutuhan kecepatan (30-90% untuk efisiensi)
Resolusi PWM	Tingkat presisi pengaturan Duty Cycle (contoh: 8-bit = 256 level)	- Resolusi rendah menyebabkan gerak-an motor tidak halus. - Resolusi tinggi (12-16 bit) memungkinkan kontrol lebih presisi.	10-12 bit (untuk aplikasi presisi seperti servo)
Rising/Falling Time	Waktu transisi sinyal dari LOW ke HIGH (rising) atau HIGH ke LOW (falling)	- Transisi terlalu lambat meningkat-kan panas pada driver. - Transisi terlalu cepat menimbulkan noise elektromagnetik (EMI).	50-200 ns (bergantung pada driver)
Voltage Level	Tegangan output dari sinyal PWM (misal: 5V, 12V, atau 24V)	- Tegangan terlalu rendah tidak cukup mengaktifkan motor. - Tegangan terlalu tinggi berisiko merusak motor/driver.	Sesuai rating motor (misal: 12V untuk motor 12V)



Gambar 3.17 Contoh diagram rangkaian proteksi.

3.3 Penggunaan Inverter dan Sistem Kelistrikan Mesin

Inverter, atau dikenal juga sebagai *Variable Frequency Drive* (VFD), merupakan komponen peting dalam sistem kelistrikan mesin industri modern. Perangkat ini berfungsi untuk mengendalikan kecepatan motor listrik secara presisi dengan menyesuaikan frekuensi dan tegangan listrik yang disuplai. Penggunaan inverter tidak hanya meningkatkan efisiensi energi tetapi juga memperpanjang usia peralatan melalui pengaturan yang lebih optimal. Pada sistem motor AC, inverter digunakan untuk mengubah tegangan DC menjadi AC dengan frekuensi yang dapat diatur, sehingga memungkinkan kontrol kecepatan dan arah putaran pada motor AC (Peng, 2003).

Inverter berperan sebagai antarmuka antara sumber listrik dan motor, dengan kemampuan mengatur kecepatan motor sesuai kebutuhan

operasi, misalnya pada conveyor yang memerlukan variasi kecepatan; menghemat konsumsi energi hingga 50% dibanding sistem konvensional, karena motor hanya bekerja sesuai beban ; meminimalisir stres mekanis melalui fitur *soft start* dan *soft stop*, sehingga mengurangi keausan pada komponen ; serta dapat memberikan proteksi otomatis terhadap gangguan seperti arus berlebih, tegangan tidak stabil, atau *overheating*.

Komponen Utama Inverter

Inverter sebagai perangkat pengendali motor listrik terdiri atas beberapa komponen inti yang bekerja secara terintegrasi. Setiap komponen tersebut saling mendukung untuk menciptakan sistem pengaturan kecepatan motor yang presisi, efisien, dan andal.

Unit Rectifier (Penyearah)

Komponen ini berfungsi sebagai pengubah arus bolak-balik (AC) dari sumber listrik menjadi arus searah (DC) melalui rangkaian dioda penyearah. Proses konversi ini merupakan tahap awal sebelum daya listrik diproses lebih lanjut.

DC Bus (Jalur Arus Searah)

Komponen ini terdiri dari kapasitor bank yang berfungsi untuk meratakan gelombang DC hasil penyearahan; menyimpan energi sementara sebelum dikonversi kembali ke AC; serta menstabilkan tegangan sebelum masuk ke tahap inversi.

Inverter Module

Komponen ini merupakan inti pengolahan daya yang menggunakan semikonduktor canggih (IGBT atau MOSFET) untuk mengkonversi kembali DC menjadi AC; menghasilkan frekuensi variabel sesuai kebutuhan dan mengatur besar tegangan output.

Control Unit Mikroprosesor

Komponen ini bisa disebut sebagai otak inverter yang berperan penting dalam mengelola dan memproses operasi inverter berdasarkan semua sinyal input/output; menjalankan algoritma control; memantau parameter operasi; memberikan proteksi sistem.

Sistem Pendingin

Biasanya terdiri dari *heat sink* dan kipas yang berfungsi menjaga suhu komponen semikonduktor tetap dalam batas aman selama operasi.

Human Interface

Meliputi panel tampilan dan tombol kontrol yang memungkinkan operator menginput parameter pengoperasian; monitoring status kerja; mendeteksi gangguan.

Rangkaian Proteksi

Rangkaian yang terintegrasi untuk melindungi sistem dari lonjakan tegangan, arus berlebih, hubung singkat, serta kondisi overheating.

3.4 Integrasi Inverter dengan Sistem Kelistrikan Mesin

Integrasi inverter dengan sistem kelistrikan mesin merujuk pada proses penyatuan dan pengoptimalan *Variable Frequency Drive* (VFD) ke dalam jaringan kelistrikan suatu mesin industri untuk mencapai kontrol motor yang presisi, efisiensi energi maksimal, serta proteksi sistem secara menyeluruh.

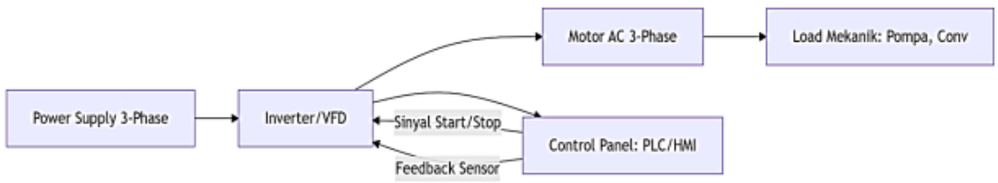
Konsep dasar dari integrase ini merupakan penghubung antara Sumber listrik 3-fasa atau 1-fasa, dilengkapi dengan proteksi seperti MCB dan surge protector; Motor listrik, dengan kabel output yang mungkin memerlukan filter harmonik untuk mengurangi noise; dan Sistem kontrol (PLC/HMI), untuk menerima perintah start/stop atau setpoint kecepatan.

Tujuan utama dari sistem integrase tersebut adalah:

a. Kontrol kecepatan variabel sesuai kebutuhan proses
b. Konversi daya listrik dengan efisiensi >95%
c. Proteksi motor dari gangguan elektrik/mekanik
d. Harmonisasi dengan jaringan kelistrikan existing

Pada Gambar 3.18 digambarkan diagram sistem kelistrikan dengan inverter menggambarkan secara visual bagaimana sebuah *Variable Frequency Drive* (VFD) terintegrasi secara lengkap dalam jaringan daya dan kontrol mesin industri. Dengan struktur utama diagram terdiri dari 3 bagian utama, yaitu sisi Input, Jaringan listrik AC sumber; Unit

Inverter, Inti pengolahan daya; dan sisi Output, Motor dan beban mekanik.



Gambar 3.18 Diagram Sistem Kelistrikan dengan Inverter

Integrasi motor listrik ke dalam sistem mekanik memerlukan pertimbangan menyeluruh mulai dari pemilihan jenis motor, metode kopling, hingga analisis beban.

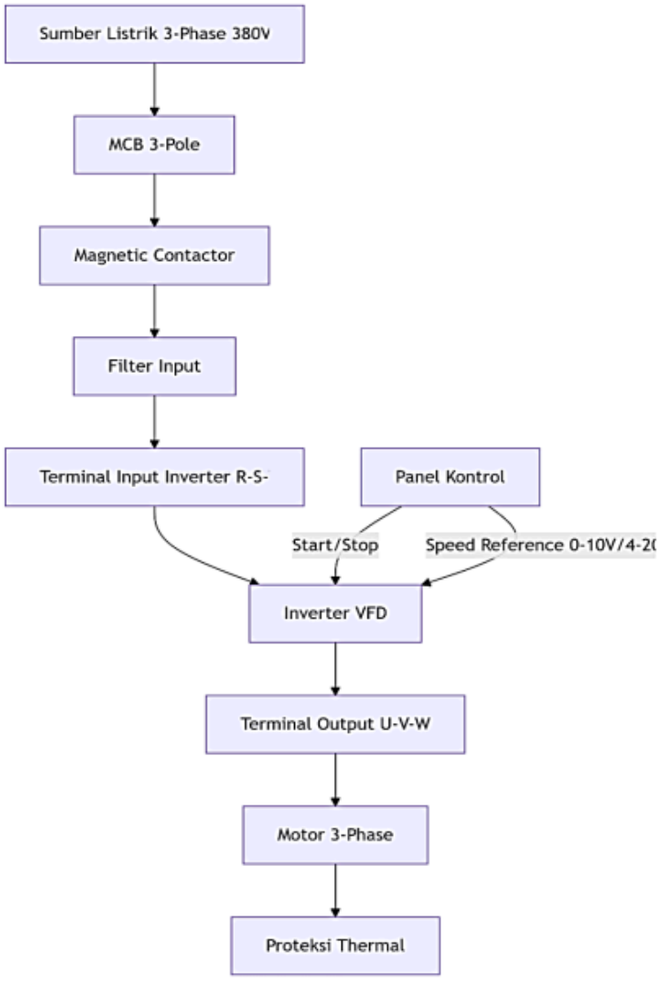
Penggunaan Inverter untuk Motor AC 3-Phase

Penggunaan inverter atau *Variable Frequency Drive* (VFD) untuk motor AC 3-phase telah menjadi transformasi fundamental dalam sistem penggerak industri kontemporer, menghadirkan sistem control yang presisi, efisiensi energi, dan fleksibilitas operasi yang canggih.
Inverter berfungsi sebagai interface cerdas antara sumber listrik AC tetap (380V/50Hz atau 480V/60Hz) dengan motor induksi tiga fase, melalui proses konversi daya multi-tahap yang canggih. Sistem ini bekerja dengan pertama-tama menyearahkan arus AC input menjadi DC melalui modul rectifier yang terdiri dari dioda bridge berkapasitas tinggi. Arus DC ini kemudian disaring dan distabilkan oleh bank kapasitor pada DC bus sebelum akhirnya diinversi kembali menjadi AC variabel menggunakan modul IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) yang dikendalikan oleh teknik *Pulse Width Modulation* (PWM) berfrekuensi tinggi (biasanya 2-20kHz).

Penggunaan inverter VFD pada motor AC 3-phase telah menjadi standar industri modern untuk mengoptimalkan kinerja sistem elektromekanis.
Dengan segala keunggulan dan inovasinya, inverter untuk motor AC 3-phase tidak hanya menjadi solusi teknis, tetapi juga strategi bisnis penting untuk mencapai,

a. *Sustainable manufacturing*
b. *Energy-efficient operation*

c. Smart industry readiness
d. *Competitive advantage* di era industri 4.0.



Gambar 3.19 Diagram Blok Sistem Pengendalian Motor 3-Phase dengan Inverter (VFD).

Seperti Gambar 3.19 tampak skema sederhana penggunaan inverter untuk motor 3 phase dengan penjelasan komponen utama dan fungsinya sebagai berikut,

1. Sumber Listrik 3-Phase
   Tegangan standar 380V/50Hz (untuk industri)
   Kabel masuk: 3 phase (R-S-T) + Grounding
2. Proteksi Input

MCB 3-Pole: Ukuran disesuaikan dengan rating inverter (misal 20A untuk motor 7.5kW), Berfungsi sebagai proteksi arus lebih Magnetic Contactor: Digunakan untuk emergency stop dan dikendalikan oleh tombol emergency.

3. Filter Input
   Sebagai opsi untuk mengurangi harmonic distortion dan dipasang sebelum terminal input inverter.
4. Koneksi Inverter
   Terminal Input (R-S-T): Terhubung ke sumber listrik melalui MCB
   Terminal Output (U-V-W): langsung ke motor tanpa melalui kontaktor tambahan.
   Grounding: Kabel grounding harus terhubung kuat ke body inverter dan motor.
5. Kontrol Inverter
   Start/Stop: Dapat menggunakan dry contact (terminal digital) atau melalui komunikasi MODBUS/Profibus.
   Speed Reference: Analog: 0-10V atau 4-20mA dari PLC/potensiometer ; Digital: Via keypad atau komunikasi jaringan.
6. Proteksi Output
   Reaktor Output (opsional): Dipasang jika panjang kabel >50 m untuk mengurangi spike tegangan.
   Proteksi Thermal Motor: PTC thermistor di motor terhubung ke terminal proteksi inverter.

Implementasi yang tepat memerlukan kolaborasi antara *electrical engineer*, *mechanical specialist*, dan *automation expert* untuk mencapai sinergi sistem yang optimal.

4

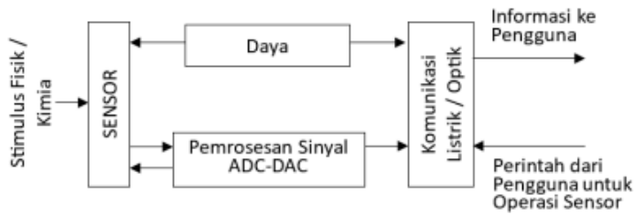
SENSOR dan AKUISISI DATA

Capaian Pembelajaran:

1. *Diharapkan Mahasiswa mampu memahami prinsip kerja berbagai jenis sensor dan penerapan sensor dalam sistem otomatis.*
2. *Diharapkan Mahasiswa mampu menjelaskan arsitektur dan tahapan sistem akuisisi data.*
3. *Diharapkan Mahasiswa mampu merancang dan mengimplementasikan sistem akuisisi data berbasis mikrokontroler dengan komunikasi nirkabel.*

4.1 Sensor

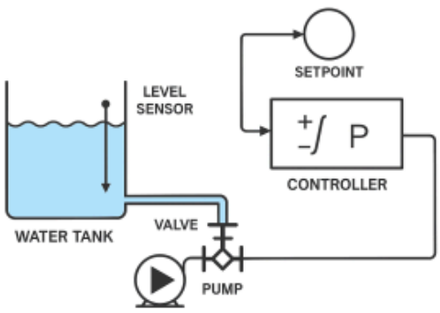
Sensor merupakan komponen penting dalam berbagai sistem teknik yang dirancang untuk mendeteksi, mengukur, dan merespons perubahan dalam variabel fisik atau kimia dari lingkungan sekitar. Sensor didefinisikan sebagai suatu perangkat yang mampu mengubah suatu besaran fisik—seperti suhu, tekanan, cahaya, kecepatan, kelembapan, atau getaran—menjadi sinyal listrik yang dapat diolah lebih lanjut oleh sistem elektronik atau komputer (Wei X and Wei Y, 2025).



Gambar 4.1 Ilustrasi arsitektur dasar sistem sensor (Hunter *et al*., 2010).

Sinyal yang dihasilkan sensor tidak dapat secara langsung digunakan (lihat Gambar 4.1,). Sinyal ini sering kali masih berupa bentuk analog yang lemah dan memerlukan penguatan, konversi, serta pengolahan lebih lanjut sebelum dapat dianalisis atau dikendalikan oleh sistem komputer atau mikrokontroler.

Sensor berfungsi sebagai penghubung antara dunia fisik dan sistem digital. Sensor menangkap fenomena atau perubahan dalam lingkungan, mengkonversinya menjadi bentuk sinyal yang terukur, dan selanjutnya memungkinkan sistem untuk melakukan analisis, pengendalian, maupun pengambilan keputusan berdasarkan informasi tersebut. Oleh karena itu, sensor sering disebut sebagai "indera" bagi sistem otomatis maupun sistem berbasis kecerdasan buatan. Sensor secara umum didefinisikan sebagai perangkat yang mampu menerima dan merespons sinyal atau rangsangan tertentu. Untuk memahami peran sensor secara lebih spesifik, perhatikan ilustrasi sistem kendali level air tangki, ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Ilustrasi Diagram Sistem Kendali Level Fluida.

Sistem dalam Gambar 4.2 merupakan sistem kendali tertutup (closed-loop) yang dirancang untuk mengatur ketinggian fluida dalam sebuah tangki (Water Tank) secara otomatis. Sistem bekerja berdasarkan perbandingan antara ketinggian fluida aktual dengan setpoint (nilai acuan) yang diinginkan, kemudian melakukan tindakan koreksi melalui kontrol pompa dan katup.

Dalam sistem tersebut, kontroler bertugas menyesuaikan ketinggian fluida di dalam tangki dengan cara mengendalikan posisi katup. Tanpa adanya mekanisme kendali, kondisi tangki sangat mungkin menjadi tidak terkendali, meluap atau bahkan kosong. Agar kontroler dapat mengambil tindakan korektif yang tepat, informasi mengenai

ketinggian fluida harus secara cepat dan akurat, informasi tersebut diperoleh melalui suatu sistem sensor. Tabel 4.1. memuat komponen utama sistem kendali air dan fungsinya. Sistem deteksi (sensor) memiliki fungsi khusus dan selektif terhadap perubahan level air (Urrea & Garcia, 2023).

Jika sistem sensor dirancang dengan baik, maka perubahan level air akan segera terlihat di dalam tabung tersebut, menandakan bahwa sensor memiliki waktu respons yang cepat. Namun, jika diameter dalam tabung terlalu kecil dan tidak sesuai dengan viskositas fluida yang digunakan, maka pembacaan level fluida pada tabung bisa tertinggal dari kondisi sebenarnya di dalam tangki. Hal ini memperkenalkan karakteristik dinamika waktu (fase) pada sistem sensor tersebut. Dalam beberapa kasus, keterlambatan tersebut masih dapat ditoleransi, tetapi pada kondisi lain, mungkin diperlukan desain tabung penglihatan yang lebih optimal. Oleh karena itu, performa sensor tidak dapat dinilai secara terpisah, melainkan harus dievaluasi sebagai bagian dari keseluruhan sistem akuisisi data.

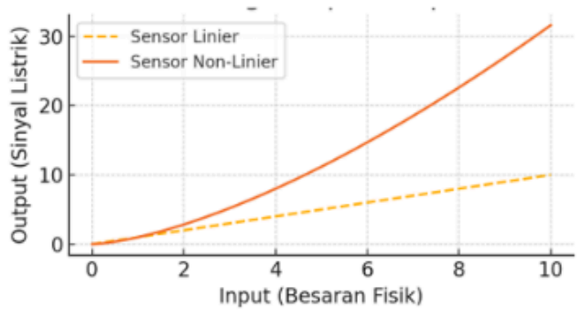
Tabel 4.1 Komponen Utama Sistem Kendali Air dan Fungsinya

Komponen	Fungsi
Water Tank	Wadah utama untuk menyimpan fluida. Level fluida di dalamnya dikendalikan.
Level Sensor	Mengukur tinggi permukaan fluida secara terus-menerus. Mengirim data ke controller.
Setpoint	Nilai referensi atau target level fluida yang diinginkan.
Controller	Menghitung error antara setpoint dan nilai sensor, lalu mengirimkan sinyal kendali.
Pump (Pompa)	Mengalirkan air masuk ke tangki. Diaktifkan/dinonaktifkan berdasarkan sinyal kendali.
Valve (Katup)	Mengatur aliran fluida ke tangki berdasarkan perintah dari *controller*.

Prinsip Kerja Sensor

Hubungan input-output sensor dapat digambarkan melalui grafik berikut, yang menunjukkan respons linier dan non-linier terhadap besaran fisik yang diukur.

Gambar 4.3 menunjukkan hubungan antara input dan output pada dua jenis sensor, yaitu sensor linier dan sensor non-linier. Pada sensor linier, terlihat bahwa output (sinyal listrik) meningkat secara proporsional terhadap input (besaran fisik), sehingga grafiknya membentuk garis lurus. Artinya, setiap kenaikan input menghasilkan kenaikan output yang tetap, menjadikan sensor ini mudah dikalibrasi dan diinterpretasikan. Sebaliknya, pada sensor non-linier, hubungan antara input dan output tidak proporsional. Output meningkat dengan laju yang lebih cepat dibanding input, membentuk kurva yang melengkung, menunjukkan bahwa sensor non-linier memiliki sensitivitas yang berubah-ubah terhadap input, sehingga diperlukan pemrosesan sinyal tambahan untuk menginterpretasikan hasilnya dengan akurat (Lakhmi et al., 2024).



Gambar 4.3 Ilustrasi Grafik hubungan input-output antara sensor linier dan non-linier.

Parameter Kinerja Sensor

Dalam sistem pengukuran dan kendali, performa sensor sangat menentukan kualitas dan keandalan informasi yang dihasilkan. Oleh karena itu, memahami parameter kinerja sensor menjadi hal yang penting dalam proses perancangan maupun pemilihan sensor untuk aplikasi tertentu. Parameter-parameter ini menggambarkan sejauh mana sensor mampu bekerja secara akurat, konsisten, dan responsif terhadap besaran fisik yang diukur.

Secara umum, parameter kinerja sensor mencakup aspek kuantitatif dan kualitatif dari hasil pengukuran. Lima parameter utama yang sering digunakan untuk mengevaluasi kinerja sensor adalah akurasi, presisi, sensitivitas, resolusi, dan waktu respon (Narainsamy & Jacobsz, 2023).

Akurasi

Akurasi adalah tingkat kedekatan hasil pengukuran yang dilakukan sensor terhadap nilai sebenarnya dari besaran yang diukur. Sensor dengan akurasi tinggi mampu memberikan hasil yang hampir sama dengan nilai standar atau referensi. Akurasi sangat penting untuk menjamin keandalan data, terutama dalam sistem kendali otomatis atau pengambilan keputusan kritis.

Contoh, Jika suhu ruangan sebenarnya adalah 25°C, dan sensor menunjukkan 24.9°C, maka sensor tersebut dianggap akurat karena nilai pengukurannya mendekati nilai sebenarnya.

Presisi

Presisi menunjukkan sejauh mana sensor dapat menghasilkan hasil pengukuran yang konsisten dalam kondisi yang sama secara berulang. Presisi yang tinggi berarti deviasi antar hasil pengukuran sangat kecil, meskipun mungkin tidak mendekati nilai sebenarnya. Dalam banyak aplikasi, presisi sangat dibutuhkan untuk menjaga kestabilan sistem dan menghindari fluktuasi yang tidak diinginkan.

Sensor bisa presisi tetapi tidak akurat, jika selalu menunjukkan nilai yang sama, tetapi salah dari nilai sebenarnya.

Sensitivitas

Sensitivitas adalah kemampuan sensor dalam mendeteksi perubahan kecil pada input dan merefleksikannya ke output. Semakin tinggi sensitivitas, maka semakin besar perubahan output yang dihasilkan untuk perubahan kecil pada input. Parameter ini sangat penting dalam sistem pemantauan yang membutuhkan deteksi perubahan yang halus, seperti detak jantung atau tekanan udara.

Contoh, Sensor suhu dengan sensitivitas 10 mV/°C akan menghasilkan perubahan output sebesar 10 mV jika suhu naik 1°C.

Resolusi

Resolusi merujuk pada perubahan terkecil pada besaran input yang masih dapat dikenali atau dibedakan oleh sensor. Semakin kecil nilai resolusi, semakin baik kemampuan sensor dalam menangkap perubahan kecil. Parameter ini sangat penting dalam aplikasi

pengukuran presisi tinggi seperti robotik, astronomi, atau kontrol industri.
Contoh, Sensor posisi dengan resolusi 0,01 mm mampu mendeteksi pergeseran sekecil 0,01 milimeter.

Waktu Respon

Waktu respon adalah lama waktu yang dibutuhkan oleh sensor untuk memberikan sinyal keluaran setelah terjadi perubahan pada input. Dalam sistem real-time seperti kendali proses industri atau perangkat medis, waktu respon yang cepat sangat diperlukan agar sistem dapat beroperasi secara efektif dan tanpa keterlambatan.
Dalam sistem pengereman otomatis mobil, sensor jarak harus merespons dalam milidetik agar keputusan sistem dapat dieksekusi tepat waktu.

Fungsi dan Peran Sensor dalam Sistem Modern

Sensor tidak hanya digunakan sebagai alat ukur, tetapi juga sebagai bagian integral dari sistem kendali otomatis. Dalam sistem tertanam, sensor bekerja sama dengan penguat sinyal (amplifier), konverter analog-ke-digital (ADC), serta unit pemroses utama (mikrokontroler atau prosesor) untuk memungkinkan sistem melakukan respons secara real-time.
Peran sensor menjadi semakin penting dalam era Internet of Things (IoT) dan kecerdasan buatan (AI), di mana jutaan sensor digunakan untuk mengumpulkan data dari berbagai sumber secara simultan dan berkesinambungan. Data ini kemudian digunakan untuk prediksi, optimasi, dan pengambilan keputusan cerdas pada berbagai bidang seperti transportasi, energi, pertanian, industri, dan layanan kesehatan.

4.2 Klasifikasi Sensor

Sensor memiliki berbagai jenis dan karakteristik yang dapat diklasifikasikan berdasarkan beberapa kriteria. Tujuan dari klasifikasi ini adalah untuk mempermudah pemahaman, pemilihan, dan

penerapan sensor yang tepat sesuai kebutuhan suatu sistem. Setiap jenis sensor memiliki prinsip kerja, keunggulan, serta batasan tertentu yang menjadikannya lebih sesuai untuk aplikasi tertentu dibandingkan yang lain (Elnemr *et al*., 2023; Regtien *et al*., 2024).

Klasifikasi Sensor Berdasarkan Sumber Energi

Sensor juga dapat diklasifikasikan berdasarkan prinsip konversi energinya.

Sensor Aktif

Sensor yang memerlukan sumber energi eksternal untuk beroperasi (misalnya, sensor termokopel atau sensor ultrasonik).

Sensor Pasif

Sensor yang dapat menghasilkan sinyal tanpa bantuan sumber energi eksternal (misalnya, fotodioda dalam kondisi tertentu).

Klasifikasi Sensor Berdasarkan Bentuk Sinyal Keluaran

Sensor Analog

Menghasilkan sinyal keluaran kontinu yang nilainya sebanding dengan nilai masukan (contohnya: termistor, sensor tekanan).

Sensor Digital

Menghasilkan sinyal keluaran dalam bentuk diskrit atau logika biner (contohnya: sensor suhu digital DS18B20, saklar proximity digital).

Klasifikasi Sensor Berdasarkan Jenis Besaran Fisik yang Diukur

Klasifikasi ini mengacu pada besaran fisik atau fenomena yang dapat dideteksi oleh sensor ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Sensor Suhu

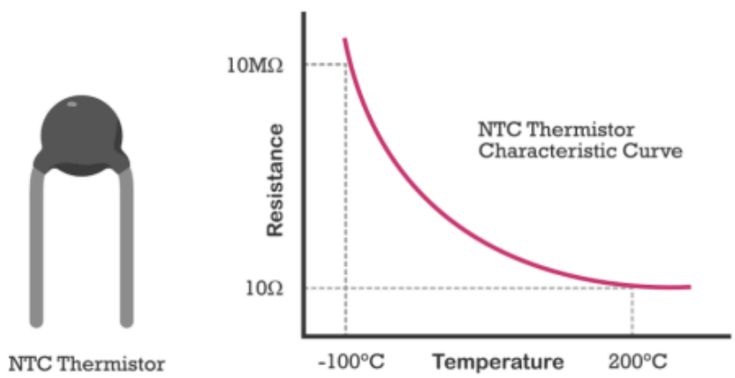
Gambar 4.4 menunjukkan NTC Thermistor (*Negative Temperature Coefficient Thermistor*) dan karakteristik kurvanya.

NTC thermistor adalah sensor suhu berbahan semikonduktor yang resistansinya menurun ketika suhu meningkat. Pada grafik terlihat

bahwa pada suhu rendah resistansi sangat tinggi (hingga mega ohm), sedangkan pada suhu tinggi resistansinya turun drastis hingga hanya beberapa ohm.

Tabel 4.3 Klasifikasi Sensor Berdasarkan Jenis Besaran Fisik yang Diukur

Jenis Sensor	Besaran yang Diukur	Contoh Sensor
Sensor Suhu	Suhu (temperatur)	Termokopel, Termistor, RTD, DS18B20
Sensor Tekanan	Tekanan udara/cairan	MPX5050, BMP180, sensor piezoelektrik
Sensor Cahaya	Intensitas cahaya	LDR, Fotodioda, Fototransistor
Sensor Kelembapan	Kelembapan relatif udara atau material	DHT11, DHT22
Sensor Jarak/Posisi	Jarak, kedekatan, posisi objek	Ultrasonik HC-SR04, sensor inframerah, LVDT
Sensor Gaya/Getaran	Gaya mekanik, getaran, tekanan sentuh	Load cell, akselerometer, piezoelektrik
Sensor Arus/Tegangan	Besaran listrik	CT sensor, voltmeter sensor, INA219
Sensor Kecepatan	Kecepatan putaran atau linier	Rotary encoder, tachometer
Sensor Gas	Konsentrasi gas tertentu	MQ-2, MQ-135, CO2 sensor
Sensor pH dan Kimia	pH, ion, komposisi kimia	pH meter, ion-selective electrode



Gambar 4.4 Sensor suhu dan karakteristik kurvanya.

Sensor Kelembapan



Pinout DHT11 Pinout DHT22

Gambar 4.5 Sensor kelembapan DHT11 dan DHT22.

Gambar 4.5 menunjukkan pinout sensor DHT11 dan DHT22, yang merupakan sensor digital untuk membaca suhu dan kelembapan udara. Keduanya digunakan pada Arduino, ESP32, atau PLC untuk sistem monitoring suhu & kelembapan. DHT11 cocok untuk proyek sederhana dan murah. DHT22 lebih tepat untuk aplikasi yang membutuhkan akurasi tinggi, misalnya sistem kendali iklim ruangan, inkubator, atau green house.

Sensor Jarak/Posisi



Gambar 4.6 Ultrasonik HC-SR04

Sensor ultrasonik **HC-SR04** bekerja dengan prinsip gelombang ultrasonik yang dipancarkan melalui transduser pemancar (*Trig*) dan diterima kembali oleh transduser penerima (*Echo*) setelah dipantulkan oleh objek (lihat Gambar 4.6). Sensor ini mengukur jarak berdasarkan waktu tempuh gelombang ultrasonik (*time of flight*).
Dengan rumus,

$$Jarak = \frac{(waktu\ x\ kecepatan\ suara)}{2}$$

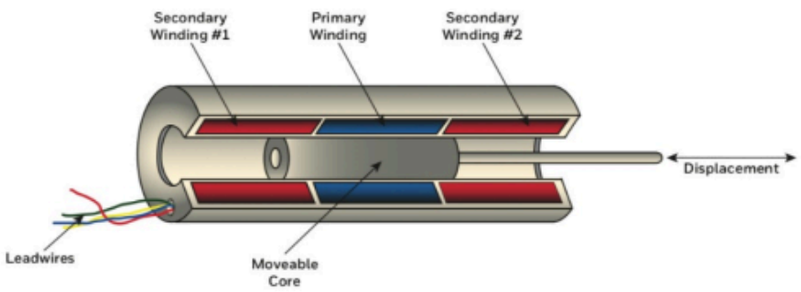
HC-SR04 mampu mengukur jarak antara 2 cm hingga 400 cm dengan akurasi ±3 mm, sehingga banyak diaplikasikan pada robot penghindar

halangan, sistem parkir otomatis, pengukur level cairan, serta perangkat IoT.
Sensor ultrasonik lebih akurat untuk pengukuran jarak menengah dengan aplikasi yang lebih luas.



Gambar 4.7 Sensor inframerah.

Sensor inframerah (IR sensor) adalah sensor yang bekerja dengan prinsip pancaran dan penerimaan sinyal cahaya inframerah. Modul ini terdiri dari IR emitter (LED inframerah) yang memancarkan cahaya tak terlihat, dan IR receiver (fotodioda atau fototransistor) yang mendeteksi pantulan sinyal tersebut dari suatu objek (lihat Gambar 4.7). Ketika ada objek di depan sensor, cahaya IR akan dipantulkan kembali dan diterima oleh penerima, menghasilkan sinyal keluaran digital. Sensor inframerah banyak digunakan untuk sistem deteksi objek, garis pada robot line follower, serta aplikasi keamanan sederhana. Modul IR juga dilengkapi dengan potensiometer untuk mengatur jarak sensitivitas, LED indikator untuk deteksi, serta pin VCC, GND, dan OUT untuk koneksi ke mikrokontroler.
Sensor inframerah lebih cocok untuk deteksi sederhana pada jarak dekat.

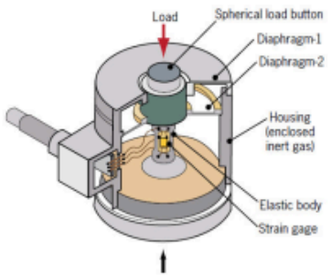


Gambar 4.8 Sensor LVDT (*linear variable differential transformer*).

Gambar 4.8 menunjukkan LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) sensor, yaitu sensor posisi atau perpindahan linier yang

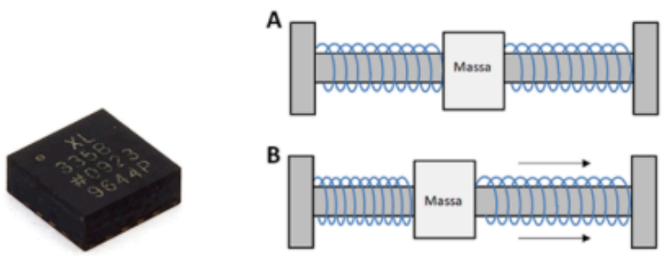
bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Digunakan untuk aplikasi industri maupun penelitian yang membutuhkan akurasi tinggi dan ketahanan jangka panjang

Sensor Gaya/Getaran



Gambar 4.9 Sel beban.

Sel beban adalah jenis sensor gaya yang, ketika terhubung ke perangkat elektronik yang sesuai, akan menghasilkan sinyal yang sebanding dengan gaya mekanis yang diterapkan pada sistem, pada Gambar 4.9. Sel beban dapat berupa hidrolik, pneumatik, atau, yang paling umum, berbasis pengukur regangan.



Gambar 4.10 Bentuk chip sensor akselerometer dan prinsip kerjanya.

Sensor akselerometer adalah perangkat elektromekanis yang digunakan untuk mengukur gaya percepatan suatu struktur. Gaya percepatan adalah pengukuran pada perubahan kecepatan. Misalnya, sebuah mobil yang berakselerasi dari posisi diam hingga 120 km/jam dalam 10 detik memiliki akselerasi setinggi 12 km/jam per detik (120 dibagi 10).

Prinsip kerja dari sensor akselerometer yang ditunjukkan Gambar 4.10, menggunakan prinsip inersia massa. Di dalamnya terdapat massa kecil yang digantung dengan pegas dan ditempatkan di antara

elektroda. Saat kondisi diam A, massa berada di tengah sehingga menghasilkan tegangan output konstan. Namun, ketika wadah bergerak B mengalami percepatan, massa cenderung tertinggal karena inersia, sehingga salah satu pegas tertekan dan yang lain meregang. Perubahan posisi massa ini menyebabkan perubahan kapasitansi atau tegangan yang sebanding dengan percepatan yang dialami. Setelah gerakan berhenti atau melambat, massa kembali ke posisi semula dan tegangan output menurun ke nilai normal.

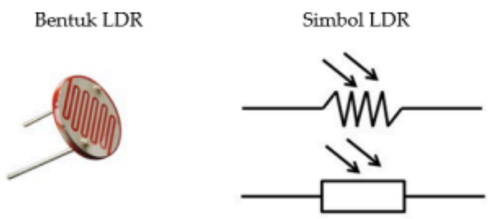
Klasifikasi Sensor Berdasarkan Prinsip Kerja

Sensor juga dapat dikelompokkan berdasarkan fenomena fisika atau mekanisme konversi energinya.

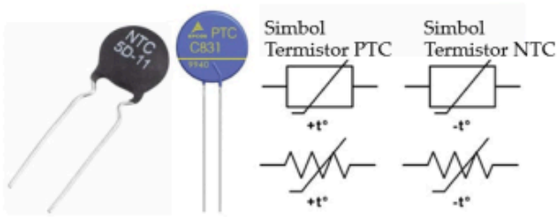
Sensor Resistif

Mengubah resistansi sebagai respons terhadap perubahan fisik (misal: LDR, termistor).

LDR termasuk sensor cahaya pasif berbasis resistor yang peka terhadap intensitas cahaya, sering digunakan dalam sistem otomatisasi berbasis perbedaan terang-gelap (Lihat Gambar 4.11.).



Gambar 4.11 Light Dependent Resistor - LDR



Gambar 4.12 Termistor

Terlihat pada Gambar 4.12, baik NTC maupun PTC digambarkan dengan simbol resistor yang diberi tanda panah/garis miring serta keterangan arah perubahan resistansi terhadap suhu. Termistor adalah resistor peka suhu.
NTC, suhu naik → resistansi turun.
PTC, suhu naik → resistansi naik.

Sensor Kapasitif

Perubahan jarak atau bahan dielektrik menyebabkan perubahan kapasitansi (misal: sensor kelembapan kapasitif).



Gambar 4.13 Sensor kelembapan kapasitif

Gambar 4.13 menunjukkan sensor kelembapan kapasitif (*Capacitive Soil Moisture Sensor*), yaitu sensor yang digunakan untuk mengukur kadar air dalam tanah. Sensor ini menggunakan perubahan kapasitansi untuk mendeteksi kelembapan. Kapasitansi akan berubah tergantung pada konstanta dielektrik tanah yang dipengaruhi oleh kadar air. Sensor ini sangat berguna dalam sistem pertanian modern karena membantu efisiensi air dan meningkatkan produktivitas tanaman.

Sensor Induktif

Mengubah induktansi akibat perubahan posisi atau medan magnet (misal: sensor logam induktif).

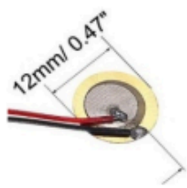


Gambar 4.14 Sensor logam induktif.

Sensor logam induktif adalah sensor kedekatan (*proximity* sensor) yang digunakan untuk mendeteksi keberadaan benda logam tanpa perlu kontak fisik (Lihat Gambar 4.14.). Sensor non-kontak yang mendeteksi logam berdasarkan perubahan medan elektromagnetik. Karena keandalan dan ketahanannya, sensor ini banyak digunakan dalam otomasi industri, otomotif, dan sistem kontrol posisi.

Sensor Piezoelektrik

Menghasilkan tegangan listrik akibat tekanan mekanik (misal: sensor getaran).

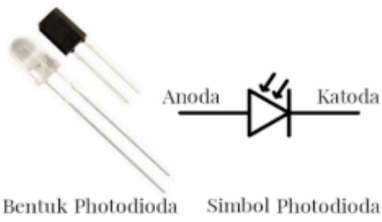


Gambar 4.15 Sensor Piezoelektrik.

Sensor piezoelektrik (lihat Gambar 4.15) adalah sensor yang bekerja berdasarkan efek piezoelektrik, yaitu kemampuan suatu material kristal (misalnya kuarsa, keramik piezo) untuk menghasilkan muatan listrik ketika dikenai tekanan mekanik, getaran, atau gaya. Sensor ini banyak digunakan dalam bidang industri, otomotif, kesehatan, hingga elektronik konsumen karena sensitivitas dan kecepatan responsnya.

Sensor Optik

Menggunakan cahaya sebagai media pendeteksi (misal: fotodioda, sensor inframerah), mengubah intensitas cahaya menjadi sinyal listrik.



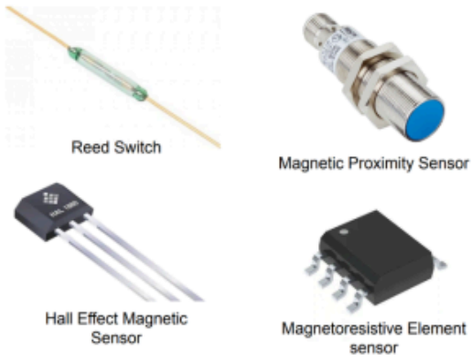
Gambar 4.16 Photodioda

Pada Gambar 4.16., salah satu jenis sensor cahaya photodioda, komponen semikonduktor yang peka terhadap cahaya. Ketika cahaya mengenai junction p-n pada photodioda, akan terbentuk pasangan

elektron-hole yang menghasilkan arus listrik. Arus ini sebanding dengan intensitas cahaya yang diterima.

Sensor Magnetik

Mendeteksi perubahan medan magnet (misal: sensor Hall-effect, reed switch).



Gambar 4.17 Jenis sensor magnetik.

Keempat sensor pada Gambar 4.17, berkaitan dengan pendeteksian medan magnet, tetapi berbeda prinsip dan aplikasi. Reed switch sederhana untuk on/off, proximity untuk deteksi logam, Hall effect untuk kecepatan/posisi, dan magnetoresistive untuk presisi tinggi seperti navigasi.

Klasifikasi Sensor Berdasarkan Kontak Fisik

Sensor dapat dibedakan berdasarkan cara interaksinya dengan objek yang diamati.

Sensor Kontak Langsung

Bersentuhan langsung dengan objek. Contoh: termokopel, load cell.

Sensor Non-Kontak

Tidak bersentuhan dengan objek, biasanya menggunakan sinyal elektromagnetik atau gelombang suara. Contoh: sensor ultrasonik, sensor inframerah.

Klasifikasi Sensor Berdasarkan Aplikasi atau Fungsinya

Klasifikasi ini mengelompokkan sensor berdasarkan bidang penggunaannya.

Otomotif, Sensor suhu mesin, sensor oksigen, sensor kecepatan roda.
Industri, Sensor tekanan, sensor level cairan, sensor jarak induktif.
Medis, Sensor EKG, sensor denyut jantung, sensor suhu tubuh.
Pertanian, Sensor kelembapan tanah, sensor suhu udara, sensor pH tanah.
Elektronika, Sensor cahaya ambient, giroskop, akselerometer, sensor sidik jari.
IoT dan *Smart city*, Sensor kualitas udara, sensor suara, sensor cahaya, GPS *module*.

4.3 Sistem Akuisisi Data (DAQ)

Sistem akuisisi data (DAQ) adalah suatu sistem yang digunakan untuk mengukur, mengumpulkan, dan mengolah data dari lingkungan fisik atau sistem proses. Data yang dikumpulkan dapat berupa suhu, tekanan, tegangan listrik, kecepatan, getaran, atau parameter lainnya yang relevan. Sistem akuisisi data memiliki fungsi utama, yaitu mengukur parameter fisis dari lingkungan atau sistem, mengubah data analog menjadi digital dengan bantuan konverter, menyimpan dan menampilkan data hasil akuisisi untuk keperluan pemantauan dan analisis, dan mengirimkan data ke sistem kontrol atau penyimpanan lainnya (Doebelin, 1990; Fraden, 2016). Akuisisi data mencakup semua perangkat keras dan perangkat lunak yang digunakan untuk mengumpulkan, mengubah, menyimpan, dan menampilkan data pengukuran (Webster & Eren, 2014).

Sistem akuisisi data mengumpulkan, memproses, menyimpan, dan mentransmisikan data dari berbagai sensor secara terdistribusi dan sinkron, berbiaya rendah, fleksibel, dan mudah diperluas (Schneider *et al*., 2023). Menurut Schock et al., sistem akuisisi data digambarkan

sebagai bagian penting dari arsitektur industri pintar (smart manufacturing). Sistem akuisisi data sebagai komponen inti dari Industrial *Internet of Things* (IIoT), yang bertugas mengumpulkan dan mentransfer data real-time dari berbagai peralatan dan sensor lapangan ke sistem analitik pusat. Sistem ini mendukung proses pengambilan keputusan berbasis data, deteksi kesalahan, dan pemeliharaan prediktif (Schock *et al*., 2021). Radia et al., mendefinisikan sistem akuisisi data adalah suatu sistem yang dirancang untuk mengumpulkan, memproses, menyimpan, dan menampilkan data dari berbagai sensor yang memantau parameter lingkungan dan operasional secara real-time. sistem akuisisi data merupakan integrasi antara perangkat keras (sensor, mikrokontroler, komputer mini) dan perangkat lunak (Radia *et al*., 2023). Dalam penelitian Prabowo et al., sistem akuisisi data sebagai penghubung antara dunia analog dan digital, yang dirancang menggunakan papan mikrokontroler Arduino. Ciri khas dari sistem akuisisi data adalah biaya rendah dan mudah dirakit (Prabowo *et al*., 2024).

Secara umum, sistem akuisisi data memiliki tiga fungsi utama:

a. Mengambil data dari lingkungan fisik melalui sensor.
b. Mengubah data menjadi format digital melalui proses pengolahan sinyal.
c. Menyimpan, menampilkan, dan/atau meneruskan data untuk keperluan monitoring atau kontrol.

Komponen Utama Sistem Akuisisi Data

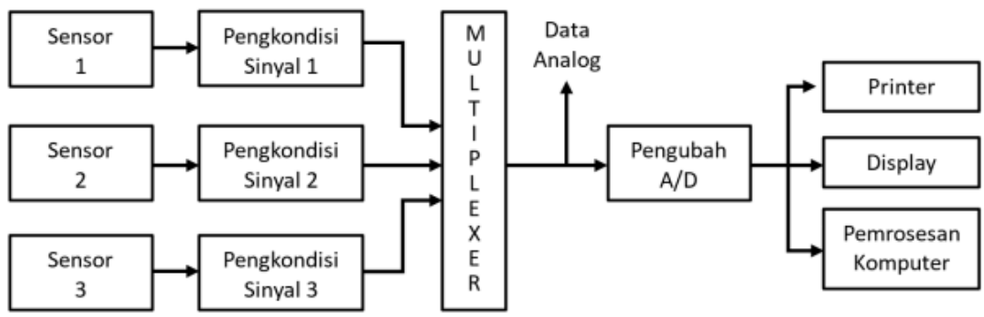
Sistem akuisisi data terdiri dari beberapa komponen utama,

1. Sensor/Transduser
   Mengubah besaran fisik (suhu, tekanan, getaran, dsb.) menjadi sinyal listrik.
2. Pengkondisi Sinyal (*Signal Conditioning*)
   Mengatur sinyal dari sensor agar sesuai dengan kebutuhan sistem, memperkuat, memfilter, atau memodifikasi sinyal agar sesuai untuk konversi.
3. Konverter Analog-ke-Digital (ADC - *Analog to Digital Converter*)
   Mengubah sinyal analog menjadi sinyal digital yang dapat diproses oleh komputer atau mikrokontroler. Kualitas ADC memengaruhi resolusi dan kecepatan pengambilan data.

4. Unit Akuisisi/Pemrosesan (DAQ Unit/ *Hardware*)
   Merupakan perangkat yang mengatur komunikasi antara sensor, ADC, dan perangkat pengolah seperti komputer. Unit akuisisi bisa berupa mikrokontroler (Arduino, STM32, ESP32), modul DAQ (NI DAQ, *LabJack*, *Advantech*), dan PLC (untuk aplikasi industri).
5. Perangkat Lunak (*Software*)
   Digunakan untuk mengontrol proses akuisisi, menganalisis, dan menampilkan data. Contohnya: *LabVIEW*, MATLAB, *Python*, atau *software* SCADA.

Hubungan antara lingkungan fisik, sensor, sistem akuisisi data, dan sistem pengolah adalah sebuah rangkaian proses yang saling berkaitan, ditunjukkan pada Gambar 4.18. Lingkungan fisik menjadi sumber informasi yang diukur oleh sensor. Sensor mengubah informasi fisik menjadi sinyal listrik, yang kemudian diproses oleh sistem akuisisi data. Hasil akuisisi data ini kemudian diolah lebih lanjut oleh sistem pengolah untuk menghasilkan informasi yang bermanfaat (Fraden, 2016).

Selain fungsinya yang vital, sistem akuisisi data modern telah mengalami transformasi signifikan dari bentuk analog konvensional menuju platform digital berbasis mikrokontroler, PLC, hingga sistem tertanam (*embedded system*). Perangkat lunak akuisisi data memungkinkan pemantauan secara waktu nyata (*real-time monitoring*), analisis statistik, serta kemampuan integrasi dengan sistem kendali otomatis.



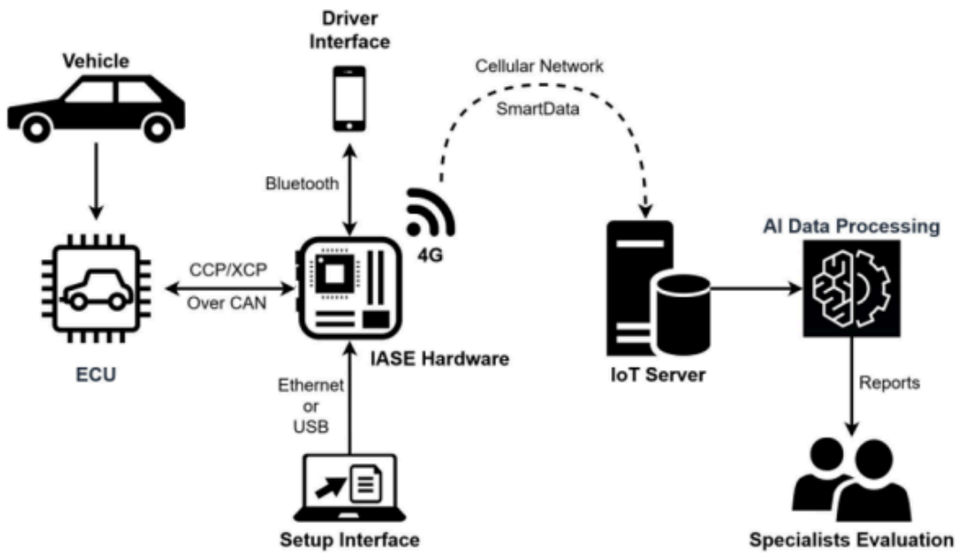
Gambar 4.18 Ilustrasi skema blok diagram sistem akuisisi data.

4.4 Jenis-Jenis Sistem Akuisisi Data

Sistem akuisisi data memiliki beragam bentuk dan konfigurasi yang disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi, lingkungan kerja, dan tingkat kompleksitas pengukuran. Pemilahan jenis sistem ini penting untuk menentukan solusi paling efektif dalam proses pemantauan, pengukuran, dan analisis data. Beberapa jenis sistem akuisisi data yang umum digunakan, mulai dari sistem mandiri (*standalone*) hingga sistem berbasis komputer, termasuk sistem terdistribusi yang mendukung pemantauan di berbagai lokasi secara simultan.

Sistem Akuisisi Data Standalone

Standalone Data Acquisition System (DAQ Mandiri) adalah sistem yang dapat mengumpulkan, menyimpan, dan kadang-kadang memproses data sensor secara independen tanpa memerlukan komputer eksternal secara terus-menerus.



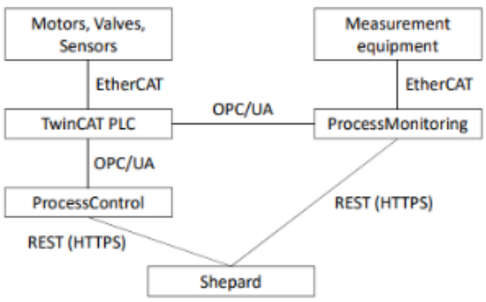
Gambar 4.19 Ilustrasi sistem skuisisi data mandiri pada unit kendali elektronik otomotif.

Sistem yang terlihat pada Gambar 4.19. termasuk dalam kategori *standalone DAQ*, artinya tidak membutuhkan komputer eksternal selama proses akuisisi berlangsung, dan mampu mengirim data ke

server IoT menggunakan koneksi 4G/LTE, dengan dukungan tambahan berupa GPS, *Bluetooth*, dan penyimpanan internal menggunakan *Micro*SD (Bedretchuk *et al*., 2023).
Sistem ini sangat berguna di lingkungan atau aplikasi di mana koneksi permanen ke komputer tidak memungkinkan, seperti dalam pemantauan jarak jauh, sistem bergerak, atau kondisi lingkungan ekstrem. Bekerja secara independen, memiliki prosesor dan media penyimpanan sendiri.

Sistem Akuisisi Data Terintegrasi dengan PC

Integrated Data Acquisition System (DAQ Terintegrasi) adalah sistem yang memerlukan komputer sebagai pusat pemrosesan data. Aplikasi sistem akuisisi data terintegrasi dengan PC dalam proses pengelasan pada Gambar 4.13., perangkat keras dikontrol menggunakan pengontrol logika terprogram (PLC) *Beckhoff TwinCAT* yang berjalan pada PC industri standar. Pengontrol motor, nilai, dll. terhubung ke PLC menggunakan protokol bus lapangan industri *EtherCAT*.



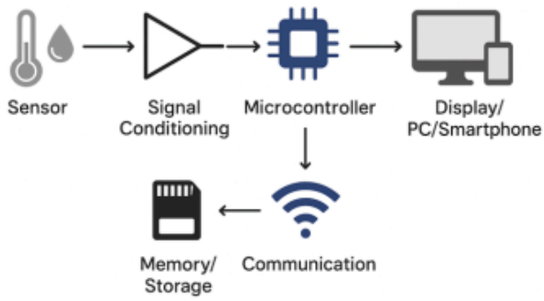
Gambar 4.13 Ilustrasi skematik sistem akuisisi data terintegrasi dengan PC dalam proses pengelasan.

Dalam transformasi digital Industri 4.0, integrasi sistem akuisisi data dengan perangkat lunak berbasis PC menjadi sangat penting untuk meningkatkan efisiensi, interoperabilitas, dan kemampuan analitik. Studi oleh Molina dkk. memperkenalkan sistem akuisisi data yang terintegrasi secara langsung dengan PC menggunakan standar komunikasi OPC UA (*Open Platform Communications Unified Architecture*), serta didukung oleh layanan cloud untuk pencatatan dan visualisasi data (Molina et al., 2023).

Sistem Akuisisi Data Berbasis Mikroprosesor/ Mikrokontroler

Umumnya digunakan dalam aplikasi embedded system.

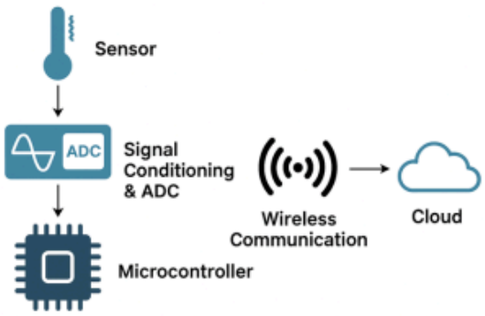
Sistem akuisisi data berbasis mikroprosesor/mikrokontroler adalah suatu sistem yang digunakan untuk mengukur, mengolah, dan menyimpan data dari sensor, kemudian menampilkannya atau mengirimkan ke perangkat lain, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.14. Mikrokontroler (seperti Arduino, STM32, ESP32, dsb.) berfungsi sebagai otak pengolah data, yang mengatur proses konversi analog ke digital (ADC), komunikasi data, dan kendali perangkat output.



Gambar 4.14 Ilustrasi diagram sistem akuisisi data berbasis mikrokontroler.

Sistem Akuisisi Data Wireless

Sistem Akuisisi Data *Wireless* adalah sistem yang digunakan untuk mengumpulkan data dari sensor, kemudian mengirimkan data tersebut ke pusat pengolahan atau monitoring menggunakan komunikasi nirkabel (*wireless*), tanpa kabel, ditunjukkan pada Gambar 4.15. Mengirimkan data secara nirkabel menggunakan *Wi-Fi*, *ZigBee*, atau *Bluetooth*.



Gambar 4.15 Ilustrasi diagram sistem akuisisi data *wireless* (Nirkabel).

Sistem ini banyak digunakan pada IoT (Internet of Things) untuk aplikasi *smart home*, *monitoring* industri, kesehatan, hingga sistem lingkungan cerdas.

Integrasi Sensor dan Sistem Akuisisi Data

Integrasi antara sensor, sistem akuisisi data, dan teknologi digital mengalami kemajuan pesat seiring dengan perkembangan bidang mikrokontroler, *Internet of Things* (IoT), serta kecerdasan buatan (AI – Artificial Intelegent) (Gouiza *et al.*, 2024). Sensor dan sistem akuisisi data kini banyak diterapkan dalam berbagai bidang.

Industri manufaktur, untuk memantau kondisi mesin, mendeteksi getaran abnormal, atau mengontrol suhu dalam proses produksi.

Sektor kesehatan, untuk mengukur parameter fisiologis pasien seperti detak jantung, tekanan darah, saturasi oksigen, dan suhu tubuh.

Pertanian presisi, untuk memantau kelembapan tanah, cuaca, dan pertumbuhan tanaman.

Transportasi dan otomotif, seperti sistem pengereman otomatis, kontrol stabilitas kendaraan, serta pemantauan konsumsi bahan bakar.

Sistem energi terbarukan, misalnya pada panel surya atau turbin angin yang memerlukan pemantauan intensif terhadap intensitas cahaya, suhu, dan tegangan keluaran.

Pemahaman menyeluruh terhadap prinsip kerja sensor, klasifikasi sensor berdasarkan fenomena fisik yang diukur, pengolahan sinyal, dan cara kerja DAQ akan mempermudah seseorang dalam merancang, mengembangkan, dan mengoptimalkan sistem otomatisasi dan pemantauan (Channi, 2024). Hal ini bukan hanya relevan untuk aplikasi industri, namun juga menjadi pondasi bagi inovasi di bidang-bidang baru seperti *wearable technology*, *smart home*, *environmental monitoring*, dan *smart agriculture* (Gu & Qian, 2025; Guan et al., 2017; Salamone *et al.*, 2021; Tatiya *et al.*, 2025).

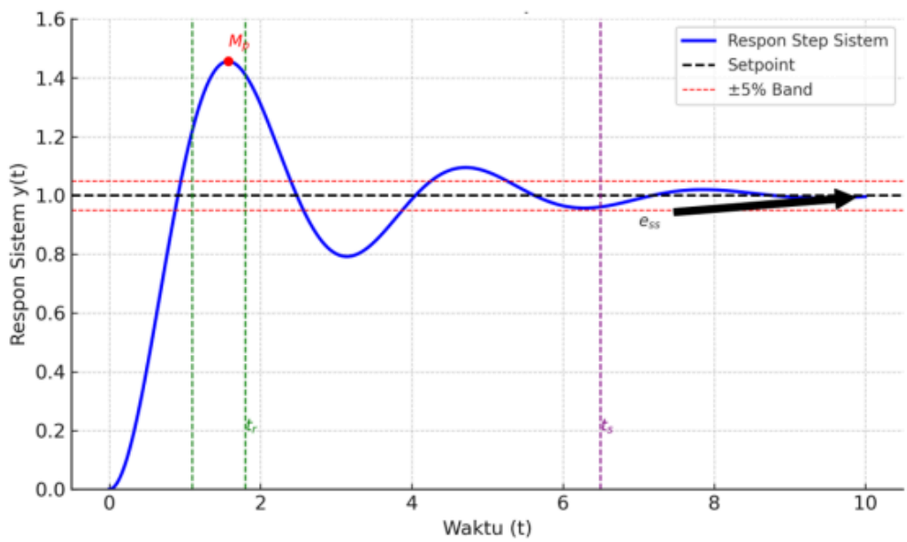
5

SISTEM KONTROL dan MIKROKONTROLER

Capaian Pembelajaran:

1. *Diharapkan mahasiswa mampu merancang dan memprogram sistem kontrol berbasis mikrokontroler atau PLC.*

5.1 Konsep Kontrol Otomatis



Gambar 5.1 Ilustrasi parameter kinerja sistem kontrol.

Sistem kontrol otomatis merupakan elemen utama dalam mekatronika, di mana tujuan utamanya adalah menjaga suatu variabel

proses (misalnya suhu, tekanan, posisi, kecepatan) agar tetap berada pada nilai yang diinginkan (*setpoint*). Kontrol ini dilakukan dengan cara membandingkan nilai aktual (*output* dari sensor) dengan nilai referensi (*setpoint*), kemudian menghasilkan sinyal kontrol untuk mengatur aktuator sehingga sistem tetap stabil (Wardhana *et al*., 2021).

Analisis Kuantitatif Respon Sistem

Dalam teori kontrol, kinerja sistem umumnya dievaluasi menggunakan beberapa parameter, yaitu:

***Rise Time* (t_r)**

Waktu yang dibutuhkan sistem untuk naik dari 10% ke 90% nilai setpoint.

***Overshoot* Maksimum (M_p)**

Persentase maksimum respon yang melampaui *setpoint*.

$$M_p = \frac{y_{max} - y_{ss}}{y_{ss}} \; x \; 100\%$$

dengan,

y_{max} = Nilai maksimum respon sistem (*output*) setelah diberikan masukan (biasanya *step input*)

y_{ss} = Nilai keadaan tunak (*steady-state value*) dari output sistem

***Settling Time* (t_s)**

Waktu yang dibutuhkan sistem untuk berada dalam toleransi ±5% dari setpoint.

***Steady-State Error* (e_{ss})**

Selisih antara nilai *setpoint* r dan *output* akhir y_{ss}

$$e_{ss} = \lim_{t \to \infty} (r(t) - y(t))$$

dengan,

$r(t)$ = *setpoint*

$y(t)$ = *output* sistem

Tiga pendekatan kontrol otomatis yang umum digunakan dalam sistem mekatronika adalah:

a. Kontrol *On-Off* (Diskrit/Biner)

b. Kontrol *Proporsional-Integral-Derivatif* (PID)
c. Logika Kontrol (termasuk logika Boolean dan logika fuzzy sederhana)

Kontrol *On-Off* (Diskrit/Biner)

Prinsip Kerja

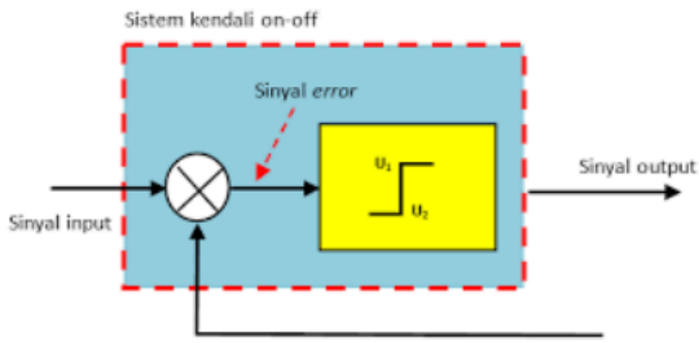
Kontrol *On-Off* adalah bentuk paling sederhana dari kontrol otomatis. Sistem ini hanya memiliki dua keadaan: *ON* (aktif) dan *OFF* (nonaktif) (Hidayat *et al*., 2018).
Jika nilai variabel proses lebih rendah dari *setpoint* → aktuator *ON*.
Jika nilai variabel proses lebih tinggi dari *setpoint* → aktuator *OFF*.
Skema ini mirip dengan termostat pada AC atau kulkas.

Secara matematis,

$$u(t) = \begin{cases} U_{max} & jika\ e(t) > 0 \\ 0 & jika\ e(t) \leq 0 \end{cases}$$

dengan
$u(t)$ = sinyal kontrol
$e(t)$ = $r(t) - y(t) = error$ (selisih *setpoint* dan *output* sistem)

Sistem ini bekerja dengan prinsip membandingkan sinyal input atau setpoint dengan sinyal umpan balik dari output sehingga menghasilkan sinyal *error* (lihat Gambar 5.2.). Sinyal error tersebut kemudian diproses oleh pengendali *on-off* yang hanya memiliki dua keadaan, yaitu U_1 (*on*) dan U_2 (*off*). Dengan demikian, keluaran sistem akan berupa tindakan menghidupkan atau mematikan aktuator sesuai kondisi *error* yang terdeteksi (Ogata, 2010).



Gambar 5.2 Ilustrasi diagram blok sistem kontrol *On-Off*.

Sistem kontrol *on-off* merupakan bentuk kontrol yang sederhana namun banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari, misalnya pada termostat kulkas, AC, dan pemanas air, di mana perangkat akan otomatis menyala saat variabel terukur berada di bawah batas tertentu, dan mati ketika sudah mencapai batas yang diinginkan.

Tabel 5.1 Kelebihan dan Kekurangan Kontrol *On-Off*

Aspek	Kelebihan	Kekurangan
Sederhana	Mudah diimplementasikan	Tidak presisi, menimbulkan osilasi
Biaya	Murah	Tidak cocok untuk sistem yang membutuhkan kestabilan tinggi
Aplikasi	Cocok untuk kontrol sederhana (lampu, pemanas, pompa)	Tidak efektif untuk proses dengan dinamika cepat

Kontrol *Proporsional-Integral-Derivatif* (PID)

Prinsip Kerja

Kontrol PID merupakan metode kontrol yang paling umum digunakan dalam sistem industri karena mampu memberikan kestabilan, kecepatan respon, dan akurasi tinggi (Hidayat *et al*., 2024). PID terdiri dari tiga komponen utama (Dubey *et al., 2021*):

P (*Proportional*) → memberikan aksi kontrol sebanding dengan besar *error*, mengurangi error sesaat.

I (Integral) → menghilangkan *error steady-state* dengan menjumlahkan error terhadap waktu.

D (*Derivative*) → memberikan aksi prediktif berdasarkan laju perubahan error.

Secara matematis,

$$u(t) = K_p\, e(t) + K_i \int_0^t e(\tau)d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

dengan,

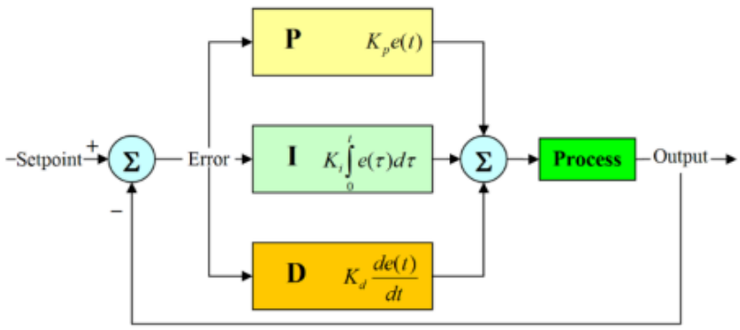
K_p = konstanta proporsional

K_i = konstanta integral

K_d = konstanta derivatif

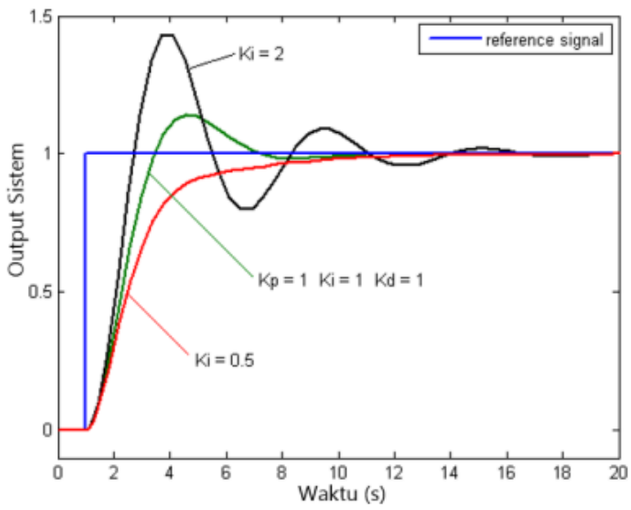
τ = variabel integrasi, nilainya diambil dari waktu nol sampai t

Diagram blok pada Gambar 5.3 menggambarkan alur kerja kontrol PID, yaitu metode kontrol yang paling banyak digunakan dalam industri karena mampu memberikan kestabilan, akurasi, dan kecepatan respon yang baik. Ilustrasi diagram blok PID menunjukkan bagaimana sistem bekerja secara loop tertutup (*closed-loop*), di mana nilai output selalu dibandingkan dengan setpoint, lalu diperbaiki melalui aksi proporsional, integral, dan derivatif (Ahing et al., 2024).



Gambar 5.3 Ilustrasi diagram blok sistem kontrol *Proporsional-Integral-Derivatif*.

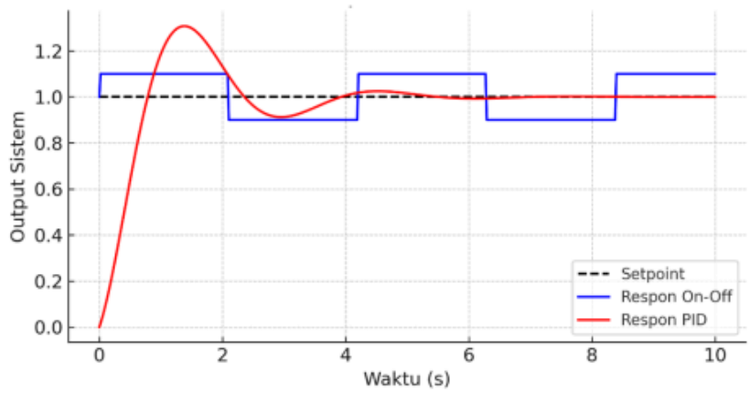
Keberadaan feedback adalah ciri utama kontrol PID. Dengan umpan balik ini, sistem dapat menyesuaikan diri secara terus-menerus agar output mendekati setpoint, sehingga lebih stabil, presisi, dan minim error dibandingkan kontrol sederhana seperti On-Off.



Gambar 5.4 Ilustrasi kurva Y vs waktu, untuk tiga nilai K_p (K_i dan K_d dijaga konstan).

Pada Gambar 5.4, menunjukkan dengan melakukan perubahan penurunan nilai K_i dihasilkan kurva respon sinyal yang lebih cepat mencapai kestabilan sistem. Aplikasi sistem kontrol PID, sebagai kontrol suhu pada industri makanan dan kimia, kontrol posisi motor servo, kontrol kecepatan mesin industri.

Pada Gambar 5.5. memperlihatkan ilustrasi perbandingan kinerja sistem kontrol *On-Off* dan PID terhadap sinyal masukan step. Respon *On-Off* cenderung berosilasi di sekitar setpoint tanpa mencapai kestabilan sempurna, sedangkan kontrol PID menunjukkan respon yang lebih halus, dengan sedikit overshoot namun lebih cepat mencapai keadaan stabil.



Gambar 5.5 Ilustrasi skema respon sistem kontrol *On-Off vs* PID.

Logika Kontrol

Prinsip Kerja

Logika kontrol menggunakan pendekatan aturan logika untuk menentukan aksi kontrol, umumnya berbasis logika Boolean atau logika fuzzy (Jaya et al., 2017). Logika Boolean, menggunakan operasi dasar gerbang logika AND, OR, NOT. Logika Fuzzy, menggunakan derajat keanggotaan (antara 0 – 1) untuk menangani sistem yang bersifat tidak pasti.

Kontrol dengan Logika Boolean

Logika Boolean merupakan pendekatan kontrol diskrit (biner) dengan hanya dua kondisi,

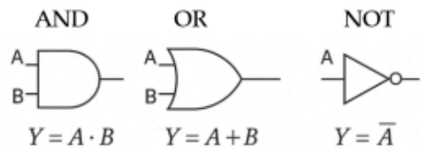
1 (true/on) → kondisi aktif atau menyala.

0 (false/off) → kondisi tidak aktif atau mati.

Aturan logika ditentukan dengan operasi logika dasar: AND, OR, NOT, NAND, NOR. Sangat sederhana, cocok untuk sistem on-off seperti termostat atau saklar lampu.

Rumus Boolean,

$$Y = A \cdot B \quad (AND)$$
$$Y = A + B \quad (OR)$$
$$Y = \bar{A} \qquad (NOT)$$



Gambar 5.6 Gerbang logika dari operasi logika AND, OR, NOT

Tabel 5.2 *Truth Table* Logika Boolean Dasar

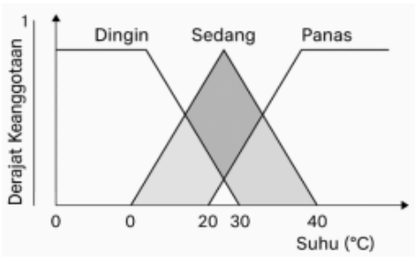
Input		Output		
A	B	A AND B $A \cdot B$	A OR B $A + B$	NOT A $\bar{A}$
0	0	0	0	1
0	1	0	1	1
1	0	0	1	0
1	1	1	1	0

Kontrol dengan Logika Fuzzy

Logika fuzzy digunakan untuk menangani ketidakpastian dan data yang tidak eksak. Tidak hanya 0 atau 1, melainkan memiliki nilai derajat keanggotaan (μ) antara 0 sampai 1 (Banggut et al., 2023). Cocok untuk sistem kompleks yang membutuhkan kontrol lebih halus. Fungsi keanggotaan bisa berbentuk segitiga, trapesium, atau Gaussian (Dirgantara et al., 2025).

Fungsi Keanggotaan

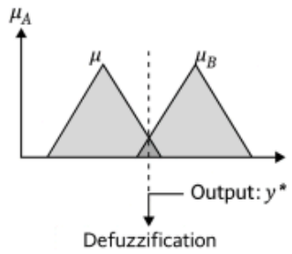
Misalnya, fungsi keanggotaan suhu (dalam °C)
Dingin: 0–20°C
Sedang: 15–30°C
Panas: 25–40°C



Gambar 5.7. Ilustrasi skema fungsi keanggotaan suhu (dalam °C).

Aturan Fuzzy (*IF–THEN Rule*)

Misalnya,
IF suhu dingin *AND* kelembapan tinggi *THEN* kipas = pelan
IF suhu panas *THEN* kipas = cepat



Gambar 5.8 Ilustrasi defuzzyfikasi dengan metode centroid.

Aplikasi kontrol logika yaitu kontrol sistem conveyor berbasis sensor limit switch, kontrol robot sederhana (line follower, obstacle avoidance), sistem otomatis berbasis mikrokontroler dengan logika keputusan.

5.2 Mikrokontroler dan PLC

Mikrokontroler adalah chip komputer kecil yang dapat diprogram untuk mengontrol perangkat elektronik. Arduino dan ESP32 adalah dua jenis mikrokontroler yang populer digunakan dalam proyek-proyek otomasi, robotik, dan IoT (Internet of Things). Mikrokontroler dan Programmable Logic Controller (PLC) adalah unit pemroses utama dalam sistem kontrol otomatis.

Mikrokontroler seperti Arduino dan ESP32, serta *Programmable Logic Controller* (PLC), kini banyak digunakan sebagai otak dari sistem otomasi industri. PLC dikenal memiliki kebisingan tinggi, gangguan, serta kemudahan komunikasi dengan berbagai sensor dan aktuator, sehingga sangat cocok untuk aplikasi industri berskala besar maupun kecil (Lu, 2022). Sementara itu, mikrokontroler menawarkan solusi yang lebih ekonomis dan mudah dikembangkan untuk prototipe atau sistem otomasi berskala kecil, bahkan dapat diintegrasikan dengan PLC untuk meningkatkan fungsionalitas dan efisiensi sistem (Wijaya *et al*., 2024).

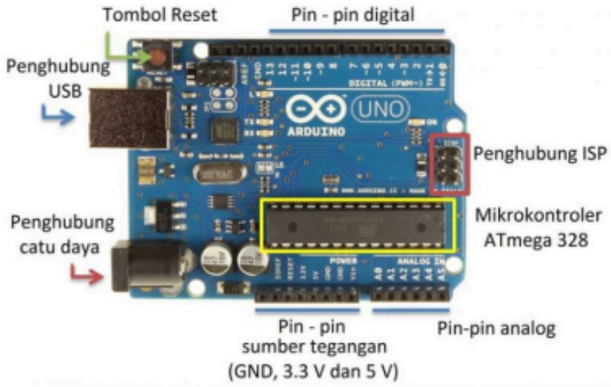
Selain itu, perancangan diagram kontrol, sistem pengkabelan, dan antarmuka pengguna seperti LCD, tombol, dan HMI sederhana sangat penting untuk memastikan sistem dapat dioperasikan dan dipantau dengan mudah oleh operator. Integrasi antara perangkat keras dan perangkat lunak yang baik akan meningkatkan kinerja sistem, memudahkan pemecahan masalah, serta memberikan pengalaman pengguna yang lebih baik dalam implementasi pengoperasian mesin cetak pakan secara otomatis (Akbar & Riady, 2022).

Mikrokontroler

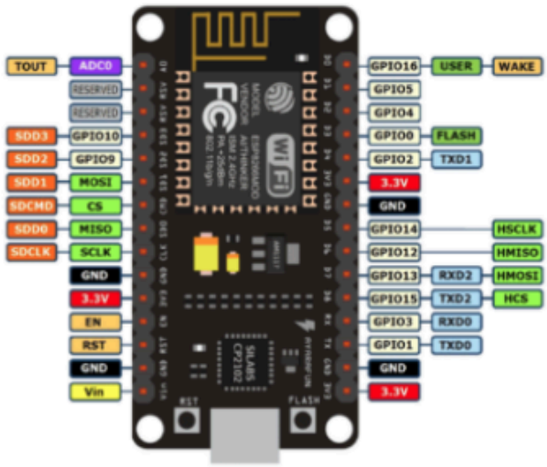
Komponen elektronik yang dapat diprogram untuk menjalankan instruksi kontrol. Sebagian macam mikrokontroler, yaitu Arduino UNO, NodeMCU ESP8266, ESP32. Sesuai digunakan untuk sistem kecil, fleksibel, dan biaya rendah. Bahasa pemrograman: C/C++, Arduino IDE.

Arduino Uno sering digunakan karena harga terjangkau, mudah diprogram, dan memiliki komunitas besar sehingga banyak tersedia *library* dan contoh kode. Digunakan dalam proyek edukasi elektronik

(pemula maupun tingkat lanjut), sensor (suhu, kelembaban, gerakan), kontrol perangkat seperti motor DC, LED, relay.



Gambar 5.9 Tampilan Arduino Uno dan bagian-bagiannya.



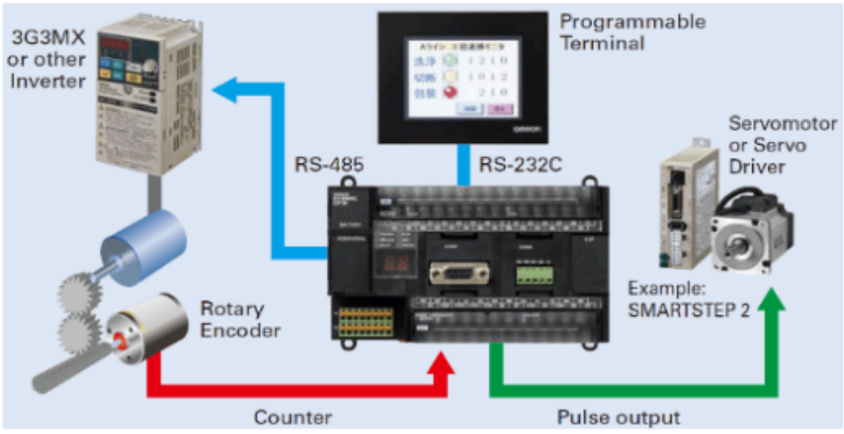
Gambar 5.10 NodeMCU ESP8266.



Gambar 5.11 Modul ESP32.

ESP32 adalah mikrokontroler dengan fitur Wi-Fi dan Bluetooth terintegrasi yang banyak digunakan dalam aplikasi IoT.

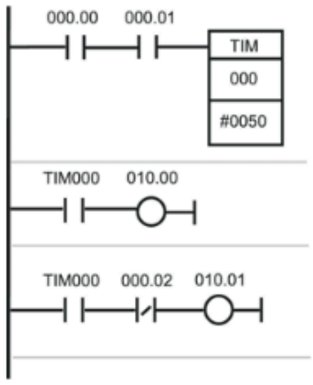
PLC (*Programmable Logic Controller*)



Gambar 5.12 Ilustrasi skema sistem kontrol berbasis PLC dengan fungsi komunikasi dan pulsa I/O.

PLC adalah komputer industri yang dirancang untuk mengontrol proses otomatis di lingkungan pabrik. PLC memiliki daya tahan tinggi, bisa bekerja dalam kondisi panas, getaran, dan debu. Bahasa pemrograman yang biasa digunakan adalah Ladder Diagram, Function Block Diagram, Structured Text. PLC yang umum di pasaran, yaitu Siemens, Omron, Mitsubishi.

Gambar 5.12. menunjukkan ilustrasi skema sistem kontrol terintegrasi berbasis PLC. PLC bertindak sebagai otak pengendali yang menghubungkan inverter, motor, rotary encoder, HMI, dan servo driver sehingga proses industri dapat berjalan otomatis dengan kontrol posisi, kecepatan, dan monitoring yang presisi.



Gambar 5.13 Contoh diagram tangga PLC: 000.xx/010.xx—grup alamat input/output, TIM000—penundaan timer 5 detik. 000.00—kontak input normal terbuka, 000.02—kontak input normal tertutup.

Pada Tabel 5.3 menunjukkan perbandingan fitur, lingkungan kerja, harga, dan aplikasi masing-masing kontroler.

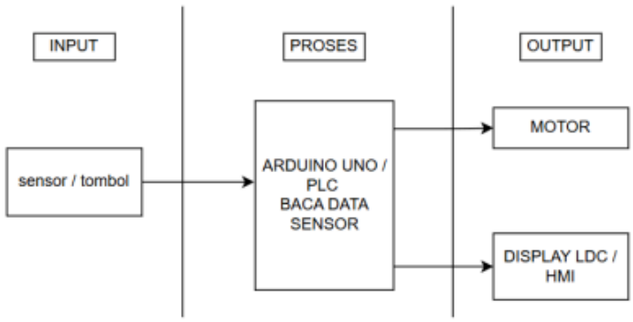
Tabel 5.3 Perbandingan Arduino dan PLC

Aspek	Arduino	PLC
Penggunaan	Prototipe, edukasi, hobi	Industri, proses otomatis
Ketahanan Lingkungan	Kurang tahan gangguan	Tahan gangguan & ekstrem
Komunikasi	I2C, SPI, UART, WiFi (ESP32)	Modbus, Profibus, Ethernet/IP
Pemrograman	C/C++ (Arduino IDE)	Ladder Diagram, FBD, ST
Multitasking	Terbatas, butuh coding tambahan	Built-in multitasking
Aplikasi Umum	Proyek kecil, IoT	Pabrik, kontrol mesin
Biaya	Murah	Lebih mahal

5.3 Diagram Kontrol dan Wiring Sistem

Diagram kontrol membantu merancang alur logika sistem, sedangkan wiring diagram menunjukkan hubungan antar komponen. Diagram blok kontrol, menjelaskan input-proses-output dari sistem (Fathoni et al., 2024). Diagram ladder (untuk PLC), representasi logika kontrol menggunakan simbol listrik. *Wiring* diagram, menunjukkan koneksi antar sensor, aktuator, dan pengendali. Hal ini penting untuk *troubleshooting* dan instalasi.

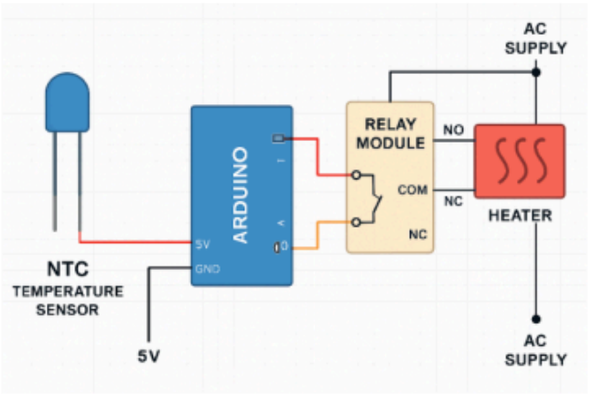
Pada Gambar 5.14 menggambarkan alur dasar sistem kontrol otomatis, yaitu input (sensor/tombol) → pemrosesan (Arduino Uno/PLC) → *output* (motor & *display*/HMI). Sistem ini banyak digunakan pada otomasi, IoT, dan industri, di mana perangkat input memberikan data, pengendali memproses, lalu hasilnya ditampilkan atau dijalankan oleh aktuator.



Gambar 5.14 Ilustrasi diagram blok sistem kontrol berbasis mikrokontroler.

Contoh, Sistem Kontrol Suhu

Input → Sensor suhu dan tombol manual.
Proses → PID atau logika kontrol.
Output → Pemanas dan kipas pendingin.



Gambar 5.15 Ilustrasi diagram wiring sistem kontrol suhu.
Diagram koneksi antara sensor suhu (NTC), Arduino, relay, dan pemanas listrik.

5.4 Interface Pengguna

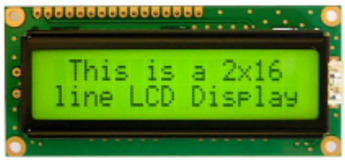
Dalam sistem kontrol berbasis mikrokontroler pada contoh aplikasi mesin cetak pakan, interface pengguna (*user interface*) menjadi jembatan utama antara operator dan sistem mesin. Tujuannya adalah untuk mempermudah interaksi manusia dengan mesin, baik dalam proses pengoperasian, pemantauan status, maupun pengaturan parameter kerja. Sistem mekatronika modern membutuhkan

antarmuka manusia-mesin (HMI) agar operator dapat memantau dan mengatur sistem.

LCD (Liquid Crystal Display)

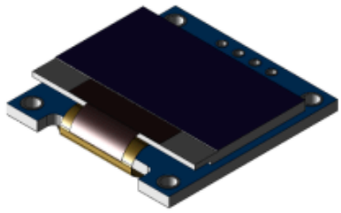
Digunakan untuk menampilkan data *real-time* (suhu, tekanan). Contoh yang umum digunakan, LCD 16x2, OLED.

LCD 16x2 adalah modul tampilan (display) berbasis *Liquid Crystal Display* (LCD) yang banyak digunakan dalam proyek elektronika, khususnya dengan mikrokontroler seperti Arduino atau PLC (lihat Gambar 5.16). LCD ini memiliki 16 kolom dan 2 baris, sehingga mampu menampilkan total 32 karakter (huruf, angka, simbol). Setiap karakter ditampilkan dalam kotak 5x8 titik piksel.



Gambar 5.16 LCD 16x2

Organic Light-Emitting Diode (OLED) (lihat Gambar 5.17) digunakan untuk membuat tampilan digital pada perangkat seperti layar televisi, monitor komputer, serta sistem portabel seperti *smartphone* dan konsol game genggam.



Gambar 5.17 Ilustrasi skema Model 3D Modul LCD OLED 0,96 inci, papan 4-pin 128x64.

Tombol dan *Switch*

Digunakan sebagai input manual. Jenisnya yaitu *push button*, *toggle switch*, *rotary encoder*.



Push button



Toggle switch



Rotary encoder

Gambar 5.18 Jenis tombol dan switch yang umum digunakan, a. *Push button*, b. *Toggle switch*, c. *Rotary encoder*.

HMI Sederhana

Human Machine Interface (HMI) adalah sistem yang berfungsi sebagai penghubung antara manusia dengan teknologi mesin (Sadi, 2020). Melalui HMI, pengguna dapat melakukan pengendalian sekaligus memantau status sistem, baik secara manual maupun melalui visualisasi komputer secara real time. HMI sering disebut juga sebagai *user interface* sekaligus sistem kontrol yang banyak dimanfaatkan dalam bidang manufaktur. Teknologi ini sangat sesuai digunakan di berbagai sektor seperti industri, pertambangan, pabrik, gas, perminyakan, bandara, maupun gedung, karena memiliki sifat yang stabil serta mampu memonitor beragam sistem, mulai dari *fire & gas system, emergency shutdown system*, hingga *process control system*.



Gambar 5.19 Ilustrasi skematik panel interface sistem kontrol mesin cetak pakan.

Tampilan panel interface atau HMI yang digunakan dalam sistem kontrol mesin cetak pakan (*feed extruder control*) ditunjukkan Gambar 5.18. Panel ini berfungsi sebagai antarmuka antara operator dengan mesin, sehingga proses pengoperasian dan pemantauan dapat dilakukan dengan mudah dan real time. Panel kontrol ini memberikan visualisasi sederhana namun efektif mengenai kondisi mesin cetak pakan. Dengan adanya HMI ini, operator dapat melakukan

pengawasan suhu, memantau status motor, serta mengendalikan mesin (start/stop) dengan cepat dan tepat.

6

IMPLEMENTASI MESIN CETAK PAKAN

Capaian Pembelajaran:

1. *Diharapkan Mahasiswa mampu menerapkan pengetahuan mekatronika pada studi kasus nyata.*

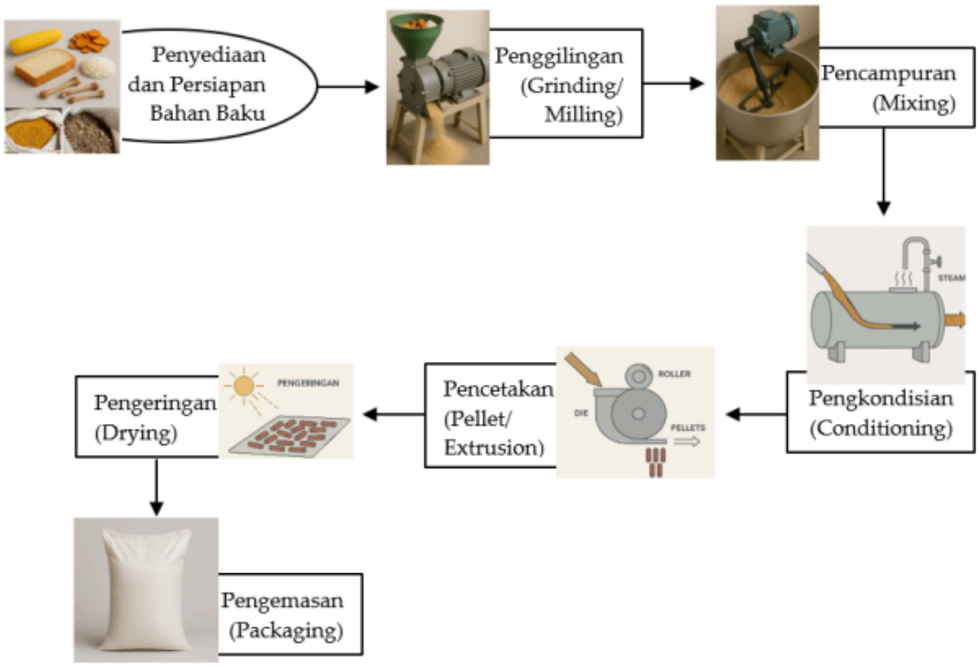
6.1 Proses dan Kebutuhan Sistem

Mesin cetak pakan otomatis yang dikembangkan dalam berbagai studi kasus memiliki tujuan utama meningkatkan efisiensi produksi pakan, menekan biaya, dan mendukung pertumbuhan budidaya ternak. Teknologi yang digunakan beragam mulai dari sistem mekanik seperti roller dan screw, hingga integrasi teknologi *Internet of Thing* (IoT) untuk pengendalian otomatis dan monitoring jarak jauh. Implementasi mesin ini dapat mempercepat proses produksi pakan, menghasilkan pelet dengan kualitas seragam, dan mengurangi ketergantungan pada tenaga manusia.

Mesin cetak pakan otomatis adalah mesin yang digunakan untuk memproduksi dan mencetak pelet atau pakan ternak secara efisien dan otomatis. Mesin ini dapat menghasilkan pakan dengan bentuk simetris dan berkualitas, yang cocok untuk berbagai jenis ternak, dalam studi kasus ini adalah pakan ikan. Kapasitas mesin ini bervariasi, misalnya ada yang mampu mencetak hingga 200 kg/jam dengan penggerak

diesel atau listrik. Penggunaan mesin ini dapat menghemat biaya pakan dan meningkatkan hasil budidaya ternak.

Sistem ini terdiri dari beberapa tahap proses yaitu pencampuran bahan, pencetakan, dan pengeringan. Ilustrasi skematik aliran proses mesin cetak pakan otomatis ditunjukkan pada Gambar 6.1. Proses ini menuntut integrasi antara komponen mekanik, elektrik, kontrol, dan sensorik agar dapat berjalan otomatis dan efisien.



Gambar 6.1 Ilustrasi skematik aliran proses mesin cetak pakan otomatis.

Penyediaan dan Persiapan Bahan Baku

Bahan baku utama pakan ternak harus dipilih sesuai kebutuhan nutrisi ternak. Bahan baku yang tersedia diambil dari limbah di sekitar lingkungan peternak, yaitu jagung, ubi kayu kering, nasi kering, roti terbuang, tulang ayam, dan cairan fermentasi olahan mandiri peternak.

Proses awal,

a. Pembersihan bahan (menghilangkan kotoran, batu, logam dengan *cleaner* atau *magnet separator*).

b. Penimbangan sesuai formula (dari hasil formulasi nutrisi yang ditentukan).

Penggilingan Bahan (*Grinding*/*Milling*)

Penggilingan bahan baku dilakukan untuk memperkecil ukuran partikel agar mudah dicampur dan mudah dicerna ternak.
Mesin yang dibutuhkan:

a. *Hammer mill* atau *disc mill* untuk menggiling jagung/dedak.
b. *Pulverizer* jika dibutuhkan tepung lebih halus.

Kebutuhan sistem terdiri dari motor listrik/diesel untuk penggerak dan saringan mesh untuk ukuran partikel.
Bahan baku dimasukkan ke dalam *hopper* (corong penampung) mesin penggilingan untuk dihancurkan. *Hopper* bisa dilengkapi dengan sensor level untuk mendeteksi kapasitas daya tampung bahan baku.

Pencampuran Bahan (*Mixing*)

Pencampuran dilakukan untuk mendapatkan homogenisasi bahan agar nutrisi merata. Bahan baku masuk ke unit pencampur (*mixer*). Proses bisa dilakukan secara otomatis berdasarkan waktu atau rasio bahan.
Mesin yang dibutuhkan: *mixer horizontal* atau *vertical mixer*.
Proses yang dilakukan:

a. Bahan kering (jagung, ubi kayu, nasi, roti) dimasukkan lebih dulu.
b. Bahan protein & aditif (tulang ayam).
c. Cairan fermentasi ditambahkan terakhir.

Waktu mixing diperlukan 10–20 menit (tergantung kapasitas mesin) (Witdarko *et al*., 2025).

Pengkondisian (*Conditioning*)

Pengkondisian dilakukan untuk meningkatkan kerekatan dan kerapatan bahan. **Penambahan cairan fermentasi dimasukkan ke dalam mixer disesuaikan dengan kebutuhan komposisi pellet.**
Proses yang dilakukan:

a. Pengeringan atau penambahan uap panas (*steam conditioning*) untuk menaikkan kadar kelembapan ±15–18% (Sukarman, 2010).

b. Membuat bahan lebih plastis dan siap dicetak.

Mesin yang dibutuhkan: *conditioner* (tabung berputar dengan injeksi uap).

Proses bisa dilakukan secara otomatis berdasarkan sensor suhu.

Pencetakan Pakan (*Pelleting/Extrusion*)

Jenis mesin yang dibutuhkan:

a. *Pellet mill* (*ring die / flat die*), menghasilkan pellet padat untuk ayam/sapi.
b. *Extruder*, untuk pakan ikan/udang, bisa mengapung atau tenggelam.

Proses yang dilakukan:

a. Bahan masuk ke *die*, ditekan oleh *roller*, keluar berbentuk silinder kecil (pellet).
b. Ukuran pellet (diameter) tergantung *die hole* (misal 2–4 mm untuk ikan, 6–10 mm untuk sapi) (Jaelani, 2021).

Proses bisa dilakukan secara otomatis menggunakan sensor tekanan dan suhu.

Pengeringan (*Drying*)

Pengeringan dilakukan untuk mengurangi kelembapan pelet setelah keluar mesin. Pengeringan alami dilakukan dengan dijemur. Proses ini untuk mengurangi kadar air agar awet untuk disimpan.

Target kelembapan akhir ±10–12% agar tidak berjamur (Styks *et al*., 2020).

Proses bisa dilakukan secara otomatis menggunakan sensor kelembapan dan suhu.

Pengemasan (*Packaging*)

Pengemasan pellet dilakukan manual, dimasukkan dalam kantong atau karung ukuran 50kg.

Dalam sistem pengemasan otomatis pakan pellet, digunakan beberapa jenis sensor untuk memastikan akurasi, kecepatan, dan kualitas proses *packaging*. Sensor yang umum digunakan yaitu: *load cell* (sensor berat), *photoelectric* sensor (sensor fotolistrik), *proximity* sensor (mendeteksi posisi mekanik), *level* sensor (sensor ketinggian), encoder (sensor putaran), *temperature* dan *humidity* sensor.

Kebutuhan Sistem Pendukung

Selain mesin utama, sistem pembuatan pakan juga memerlukan sistem tenaga yaitu motor listrik/diesel, panel kontrol, inverter. Sistem aliran bahan yaitu *bucket elevator, screw conveyor, belt conveyor.*

Sistem Otomatisasi

Dalam perancangan mesin cetak pakan modern, diperlukan suatu sistem yang terintegrasi untuk memastikan proses produksi berjalan efisien, konsisten, dan berkualitas tinggi. Kebutuhan sistem tidak hanya sebatas pada mesin pencetak, tetapi juga mencakup kontrol otomatis, pemantauan kondisi, dan kemudahan pengaturan. Oleh karena itu, beberapa komponen utama yang dibutuhkan adalah:

a. Sistem pengumpan otomatis.
b. Kendali suhu ekstruder.
c. Sensor kelembaban pakan.
d. Pengendali motor *screw* dan pisau pemotong.
e. Sistem antarmuka pengguna untuk pengaturan parameter.

Sistem Pengumpan Otomatis (*Automatic feeder system*)

Pada mesin pakan otomatis, sistem pengumpan untuk mengalirkan bahan baku dengan cara yang sudah terukur dan terkendali dari tempat penampungan (*hopper*) menuju ke tahap *mixer* ataupun *extruder*. Sistem ini terkontrol otomatis agar efisien dan presisi.

Fungsi dari sistem pengumpan otomatis adalah:

a. mengatur jumlah bahan baku yang masuk ke mesin otomatis,
b. menjaga kontinuitas aliran bahan baku tanpa diisi manual atau terus menerus,
c. mengoptimalkan efisiensi proses produksi pakan.

Manfaat dari sistem pengumpan otomatis adalah:

a. meningkatkan efisiensi dan kapasitas produksi,
b. mengurangi intervensi manual,
c. menjaga kualitas pelet lebih terjaga.

Kendali Suhu *Extruder*

Kendali suhu *extruder* merupakan bagian penting dalam memastikan kualitas, tekstur, dan kepadatan pelet pakan yang dihasilkan. Suhu

yang tidak stabil dapat menyebabkan pelet menjadi rapuh, terlalu lembek, atau tidak terbentuk sempurna.

Sensor Kelembapan Pakan

Sensor kelembapan berfungsi untuk mengukur kadar air (*moisture content*) dalam bahan pakan, terutama pada tahap pengeringan maupun penyimpanan.

Pengendalian kelembapan sangat penting karena:

a. Jika kadar air terlalu tinggi, pellet mudah berjamur dan tidak tahan lama saat disimpan.
b. Jika kadar air terlalu rendah, pellet menjadi rapuh dan mudah hancur.

Dengan adanya sensor kelembapan, sistem dapat memberikan umpan balik (*feedback*) untuk mengatur proses pengeringan atau pendinginan, sehingga kelembapan pakan berada pada kisaran ideal (±10–12%) (Styks *et al*., 2020).

Pengendali Motor *Screw* dan Pisau Pemotong

Pada mesin cetak pakan otomatis, komponen ini penting, karena motor *screw* mengatur laju aliran bahan menuju die, sedangkan pisau pemotong menentukan panjang pelet.

Pengendali motor screw (pengumpan) berfungsi untuk mendorong bahan dari *hopper* ke *extruder* secara terus-menerus. Kecepatan motor menentukan tekanan dan volume output di *extruder*.

Pengendali pisau pemotong (*Cutter*) berfungsi untuk memotong pelet yang keluar dari *extruder* dengan ukuran panjang yang sama. Sistem kendali bisa dilakukan berbasis waktu (*interval timer*) atau sinkron dengan ***screw*** (sensor kecepatan putar/*encoder*).

Sistem Antarmuka Pengguna (*user interface*/UI)

Pada mesin cetak pakan otomatis sangat penting untuk memudahkan operator dalam mengatur parameter kerja**,** memantau kondisi mesin**,** **dan** melakukan kontrol manual atau otomatis**.**

6.2 Desain Prototipe Mesin Pakan Berbasis Mekatronika

Mesin pakan berbasis mekatronika adalah sistem terpadu yang menggabungkan komponen mekanik, elektronik, sistem kontrol, dan sensor untuk memproduksi pakan (pelet) secara otomatis dan efisien. Desain prototipe dibuat dengan pendekatan modular. Setiap modul atau subsistem dirancang untuk fungsi tertentu namun saling terintegrasi. Mesin pakan berbasis mekatronika adalah solusi modern dalam industri peternakan kecil hingga menengah. Dengan penggabungan teknologi mekanik, sensor, dan kontrol digital, mesin pakan dapat mengurangi beban kerja manual, menjamin kualitas dan kuantitas pakan, serta lebih hemat energi dan efisien.

Subsistem Mekanik pada Mesin Pakan Otomatis

Subsistem mekanik berfungsi untuk melakukan transformasi energi listrik menjadi gerakan mekanis dalam berbagai tahap produksi pakan. Subsistem mekanik merupakan komponen yang berperan langsung dalam proses kerja mesin cetak pakan, mencakup tahap pemasukan bahan, pemadatan, pencetakan, serta pemotongan dan pemindahan hasil cetak. Komponen mekanik dan fungsinya dapat dilihat pada Tabel 6.1.

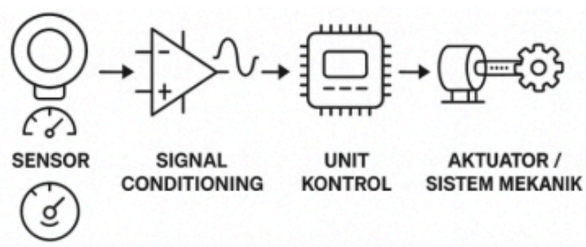
Subsistem mekanik membutuhkan dukungan subsistem elektrik agar dapat bekerja otomatis dan presisi.

Subsistem Elektrik pada Mesin Pakan Otomatis

Subsistem elektrik merupakan komponen penting dalam mesin pakan otomatis karena berfungsi sebagai pengendali, penggerak, serta pemberi energi pada berbagai unit kerja, seperti ditunjukkan dalam Tabel 6.2. Keandalan sistem elektrik akan menentukan stabilitas proses, efisiensi energi, dan keselamatan operasi.

Tabel 6.1 Komponen Mekanik dan Fungsinya

Komponen Mekanika	Fungsi Utama
Hopper (Corong Bahan)	Wadah awal tempat bahan baku pakan dimasukkan sebelum masuk ke sistem pengumpanan.
Screw Conveyor / Auger	Mengalirkan bahan dari hopper menuju ruang pemadatan dengan kecepatan yang terkontrol.
Roller Tekan / Compression Roller	Memberikan tekanan pada bahan untuk membentuk pellet atau cetakan pakan yang padat.
Die / Cetakan	Cetakan berlubang yang menentukan bentuk dan ukuran pellet pakan.
Pisau Pemotong (*Cutter Blade*)	Memotong pellet pakan sesuai panjang yang diinginkan setelah keluar dari die.
Poros dan Bantalan (*Shaft and Bearing*)	Meneruskan putaran motor ke screw atau roller, serta menahan beban mekanis.
Rangka Mesin (*Frame*)	Struktur utama yang menopang seluruh komponen mesin agar kokoh dan stabil.
Gear box / Transmisi	Mengatur torsi dan kecepatan putaran dari motor ke komponen mekanik (screw, roller, pisau).
Sabuk dan Puli / Rantai dan *Sprocket*	Mekanisme transmisi tambahan untuk menyalurkan putaran motor ke komponen lain.
Pelat Penekan / *Compression Plate*	Membantu menekan bahan sebelum masuk ke cetakan agar lebih padat dan merata.
Sistem Pendingin (*Cooling Fan / Water Jacket*)	Menurunkan suhu pada die atau roller agar tidak terjadi overheating.
Saluran Keluar (*Outlet Chute*)	Jalur keluarnya pellet pakan setelah dipotong sebelum dikumpulkan.



Gambar 6.2 Ilustrasi skematik alur instrumentasi sensor.

Tabel 6.2 Ilustrasi Komponen Elektrik Perancangan Mesin Cetak Pakan Otomatis

Komponen Elektrik	Fungsi Utama
Motor Listrik (AC/DC Motor)	Menggerakkan screw conveyor, pencetak pellet, atau pisau pemotong.
Inverter / Variable Frequency Drive (VFD)	Mengatur kecepatan dan torsi motor induksi sesuai kebutuhan proses.
Power Supply / Catu Daya	Menyediakan tegangan (misalnya 24V DC) untuk sensor, PLC, dan sistem kontrol.
PLC / Mikrokontroler	Mengendalikan proses otomatis berdasarkan input sensor dan logika pemrograman.
Sensor Suhu (Thermocouple/PT100)	Mengukur suhu pemanas dan adonan pakan.
Sensor Kelembaban	Memantau kadar air dalam bahan pakan.
Proximity Sensor / Limit Switch	Mendeteksi posisi komponen bergerak (misalnya screw atau pisau pemotong).
Sensor Arus / Beban Motor	Mengukur beban kerja motor, melindungi dari overload.
Relay dan Kontaktor	Menghubungkan atau memutus arus listrik besar berdasarkan perintah kontrol.
Heater / Elemen Pemanas	Memanaskan adonan agar lebih plastis sebelum dicetak.
Panel Kontrol Listrik	Tempat integrasi semua komponen (MCB, relay, PLC, inverter, indikator).
Kabel & Terminal Block	Menghubungkan arus dan sinyal antar komponen secara aman.
Sistem Proteksi (MCB, Fuse, Overload Relay)	Melindungi sistem dari korsleting, arus lebih, dan beban berlebih.

Dalam sistem sensor dan instrumentasi pada mesin cetak pakan otomatis, sensor tidak berdiri sendiri. Setelah sensor menangkap data dari proses fisik, sinyal tersebut harus diproses agar bisa dipahami oleh sistem kontrol. Sensor memberikan sinyal ke PLC/mikrokontroler untuk pengendalian proses.

Sistem Proteksi dan Keselamatan

Emergency stop untuk mematikan mesin secara cepat.
Overload protection untuk mencegah kerusakan motor.
Grounding dan sistem proteksi arus bocor untuk keamanan operator.

Sistem Antarmuka (*User Interface*)

Berupa HMI (*Human Machine Interface*), panel LCD, atau touchscreen. Operator dapat mengatur parameter suhu ekstruder, kecepatan screw, lama pengeringan, target berat kemasan.

Subsistem elektrik ini berperan sebagai pengendali utama dalam mesin pakan otomatis, yang mengintegrasikan motor, sensor, dan kontroler untuk menghasilkan proses yang efisien, aman, dan stabil.

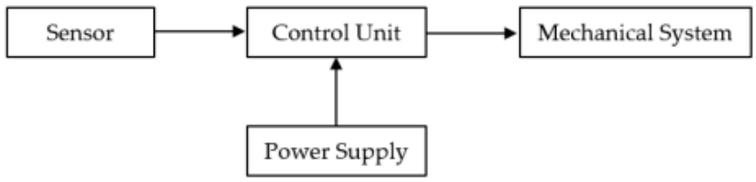
Subsistem Kontrol pada Mesin Pakan Otomatis

Subsistem kontrol berfungsi sebagai penghubung antara sensor, aktuator, dan operator. Dengan adanya kontrol otomatis, mesin pakan mampu menjaga kualitas pellet tetap konsisten, meningkatkan efisiensi energi, dan meminimalkan kesalahan manusia. Komponen control mesin cetak pakan otomatis ditunjukkan dalam Tabel 6.3.

Tabel 6.3 Komponen Kontrol Mesin Cetak Pakan Otomatis

Komponen Kontrol	Fungsi Utama
PLC	Mengendalikan seluruh proses otomatisasi berdasarkan program yang ditentukan.
HMI	Menjadi antarmuka bagi operator untuk memantau dan mengatur parameter proses.
Panel Kontrol	Tempat integrasi komponen kontrol (PLC, HMI, inverter, relay, dll.).
Inverter / VFD	Mengontrol kecepatan dan torsi motor sesuai kebutuhan.
Relay dan Kontaktor	Menyambung dan memutus arus listrik ke aktuator/motor sesuai sinyal kontrol.
Limit Switch / Proximity Sensor	Memberikan sinyal ke sistem kontrol terkait posisi mekanik atau pergerakan.
Sensor Suhu & Kelembaban	Memberikan data kondisi bahan (suhu, kadar air) ke PLC untuk pengendalian.
Sensor Arus / Beban Motor	Memberikan informasi beban motor agar sistem dapat mencegah overload.
Emergency Stop (E-Stop)	Tombol darurat untuk menghentikan semua proses mesin secara cepat dan aman.
Timer dan Counter (dalam PLC)	Mengatur waktu proses dan menghitung jumlah pakan yang diproduksi.

Subsistem kontrol berfungsi sebagai otak pengendali yang mengkoordinasikan kerja subsistem elektrik dan mekanik agar proses produksi pakan berjalan otomatis, presisi, dan efisien. Sistem ini terdiri dari perangkat keras (hardware) dan perangkat lunak (software) yang saling terintegrasi.



Gambar 6.3 Ilustrasi blok diagram sistem cetak pakan otomatis sebagai aplikasi sistem mekatronika.

Desain Mesin pakan

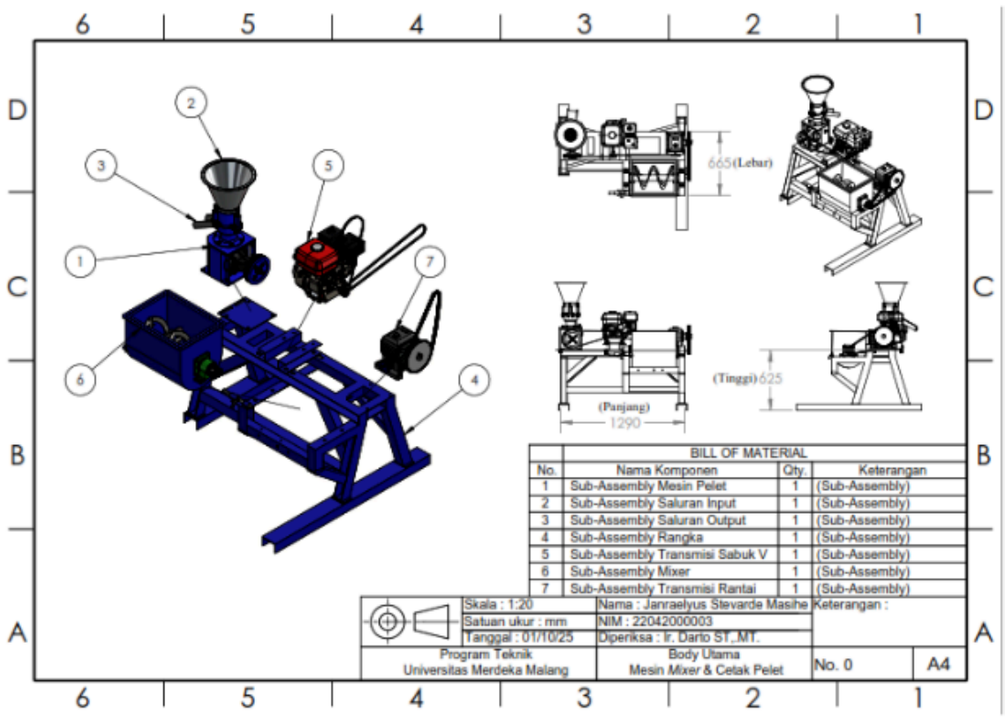
Gambar 6.4. menunjukkan ilustrasi rancangan body utama mesin pellet dengan skema Bill of Material yang lengkap. Mesin ini memadukan elemen mekanik (rangka, saluran input/output, cetakan pellet), transmisi (sabuk-V), dan penggerak (motor bensin). Keseluruhan sistem dirancang modular sehingga mudah untuk dirakit, diperbaiki, maupun dimodifikasi sesuai kapasitas produksi pakan ternak yang dibutuhkan. Spesifikasi teknis dari mesin yang dirancang ditunjukkan dalam Tabel 6.4. Ilustrasi skematik desain mesin pellet yang dibangun ditunjukkan pada Gambar 6.4

Tabel 6.4 Spesifikasi Teknis Mesin Cetak Pakan Yang Dibangun

SPESIFIKASI TEKNIS			
Parameter		Dimensi/Peralatan	Satuan
Dimensi (panjang x lebar x tinggi)	:	1335 x 1300 x 1328	(mm)
Daya motor penggerak	:	16	(HP)
Kapasitas produksi	:	200	(kg/hari)
Penggerak	:	Motor bakar (Pertalite)	-

Cara Kerja Mesin

Bahan baku pakan ikan, seperti tepung ikan, tepung jagung, dan bahan lainnya, dicampur dan dihaluskan terlebih dahulu. Motor menggerakkan screw extruder (ulir) yang berada di dalam silinder. Screw extruder mendorong adonan bahan baku ke arah ujung silinder. Adonan ditekan dan dipadatkan oleh ulir tersebut, sehingga keluar melalui lubang-lubang pada cetakan (die). Bahan baku yang keluar dari cetakan (die) akan memiliki bentuk pelet yang seragam. Pelet yang keluar dari die biasanya langsung dipotong oleh pisau yang terletak di dekat lubang cetakan.



Gambar 6.4 Ilustrasi skematik desain mesin pellet.

6.3 Implementasi dan Pengujian

Implementasi adalah tahap penerapan rancangan (desain) ke dalam bentuk nyata atau operasional. Ini berarti semua perencanaan, spesifikasi, dan skema yang telah dibuat pada tahap desain diwujudkan secara fisik atau sistematis.

Pengujian (*testing*) adalah proses mengevaluasi fungsi, performa, dan keandalan dari sistem atau prototipe yang telah diimplementasikan. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa sistem berjalan sesuai dengan spesifikasi dan menghasilkan output yang benar dan konsisten.

Prototipe mesin direalisasikan di laboratorium dengan bahan-bahan lokal. Setiap subsistem diuji secara terpisah terlebih dahulu.

Uji Sensor

Pengujian sensor suhu dan kelembaban dilakukan dengan cara membandingkan hasil pembacaan sensor dengan alat ukur standar yang telah terkalibrasi. Proses ini bertujuan untuk memastikan akurasi sensor sebelum digunakan dalam sistem. Hasil uji menunjukkan tingkat kesalahan relatif kecil, sehingga sensor layak dipakai sebagai referensi kendali suhu dan kelembaban pada mesin.

Uji Motor dan Driver

Motor DC diuji dengan berbagai variasi beban untuk mengetahui respon torsi dan kestabilan putaran. Sementara itu, motor stepper diuji dengan mengatur kecepatan serta ketepatan sudut putar untuk memastikan kemampuan dalam proses pemotongan pakan.
Motor DC diuji dengan berbagai beban, sedangkan motor stepper diuji untuk kecepatan dan sudut potong.

Uji Pemanasan

Sistem pemanas (*heater*) dievaluasi untuk melihat kestabilan suhu ekstruder. Uji dilakukan dengan pemantauan berkelanjutan terhadap perubahan suhu saat heater beroperasi.
Sistem heater diuji untuk mempertahankan suhu ekstruder pada 130–150 °C.

Uji Kontrol

Logika kontrol berbasis arduino diuji dengan memberikan skenario gangguan sensor dan pengaturan manual untuk memastikan sistem dapat merespons kondisi abnormal. Pengujian ini bertujuan untuk menilai keandalan sistem kendali dalam kondisi nyata.

Uji Sistem Keseluruhan

Setelah setiap modul berhasil diuji, seluruh komponen dirakit menjadi satu kesatuan sistem dan dilakukan uji coba menyeluruh. Fokus pengujian meliputi durasi pencetakan pakan, konsistensi ukuran serta bentuk pakan, dan konsumsi daya listrik selama operasi.

6.4 Evaluasi Performa dan Potensi Pengembangan

Pengujian keseluruhan sistem mesin pencetak pakan pelet dengan berbagai campuran bahan seperti jagung, ubi kayu kering, nasi kering, roti terbuang, tulang ayam, dan cairan fermentasi, menunjukkan bahwa mesin mampu menghasilkan pelet dengan ukuran seragam (umumnya 3–5 mm), padat sesuai kebutuhan pakan ikan. Hal ini penting untuk efisiensi pemberian pakan pada ikan lele.
Kapasitas produksi rata-rata mencapai 200 kg/hari tergantung jenis bahan dan kadar kelembapannya. Mesin bekerja stabil selama kira-kira 1–2 jam tanpa *overheating*, terutama jika dilengkapi dengan pendingin pasif atau ventilasi yang memadai.

Kelebihan Prototipe

Biaya rendah dan mudah dirakit.
Kontrol suhu dan kelembaban stabil.
Ukuran pakan konsisten.
Mudah dioperasikan oleh peternak.

Kekurangan Prototipe

Belum menggunakan sistem kontrol.
Kapasitas produksi masih rendah.

Potensi Pengembangan

Integrasi IoT untuk monitoring suhu extruder.
Penggunaan material tahan karat untuk struktur utama.
Penambahan sistem pencampur otomatis berbasis *load cell*.
Implementasi panel surya sebagai sumber energi alternatif.

RINGKASAN

Konsep Dasar Mekatronika

Mekatronika merupakan bidang ilmu interdisipliner yang menggabungkan teknik mesin, teknik elektro, sistem kendali, dan teknologi informasi dalam satu sistem terpadu. Istilah ini pertama kali diperkenalkan oleh Tetsuro Mori pada tahun 1969. Tujuan utama mekatronika adalah menciptakan sistem otomatis yang efisien, presisi, dan adaptif terhadap perubahan lingkungan. Perkembangan mekatronika berlangsung secara bertahap seiring dengan kemajuan teknologi, mulai dari kendali analog, penggunaan mikrokontroler, hingga integrasi kecerdasan buatan dan *Internet of Things* (IoT).

Sistem mekatronika terdiri atas lima elemen utama, yaitu sistem mekanis, sensor dan transduser, kontrol otomatis, elektronika dan mikrokontroler, serta komputasi dan sistem informasi. Integrasi kelima elemen ini memungkinkan perangkat untuk merespons lingkungan secara real-time dan melakukan pengambilan keputusan otomatis. Aplikasi mekatronika meliputi berbagai sektor industri seperti manufaktur, otomotif, elektronik, pangan, kesehatan, energi, pertanian, dan transportasi.

Penerapan mekatronika bertujuan untuk meningkatkan efisiensi, mutu produk, keselamatan kerja, serta fleksibilitas produksi. Selain itu, mekatronika juga memainkan peran penting dalam pengembangan inovasi dan pendidikan teknis di era digital. Pemahaman terhadap konsep mekatronika menjadi sangat penting dalam menghadapi tantangan industri modern berbasis otomasi dan teknologi cerdas.

Komponen Mekanik Dalam Sistem Mekatronika

Berbagai komponen mekanik dalam sistem mekatronika. Mesin penggerak mula (*prime mover*) merupakan sumber tenaga utama yang mengubah energi alamiah seperti bensin, solar, uap, air, angin, atau

listrik menjadi energi mekanik, dengan contoh mesin pembakaran dalam, mesin pembakaran luar, turbin, dan motor listrik. Selanjutnya, dibahas elemen transmisi daya yang berfungsi menyalurkan tenaga, mencakup roda gigi (*spur, bevel, worm*), transmisi sabuk (V-*belt, timing belt*, sabuk datar), serta transmisi rantai (*roller, silent, toothed, conveyor*). Kopling juga dijelaskan sebagai penghubung dua poros, yang terbagi menjadi kopling tetap (misalnya flens kaku dan flens tempa) serta kopling luwes/fleksibel (misalnya kopling karet, gigi, rantai, universal, fluida). Sistem penggerak mekanik seperti *screw conveyor* digunakan untuk memindahkan material dengan ulir berputar, sedangkan *extruder* digunakan untuk membentuk produk melalui proses penekanan dan pemanasan material. Analisis teknis meliputi torsi, beban, dan efisiensi mekanik yang penting dalam menentukan spesifikasi mesin. Akhirnya, bab ini menekankan pentingnya pemilihan material dan struktur mesin, misalnya baja karbon untuk poros, *stainless steel* untuk *hopper*, serta desain rangka yang stabil, modular, dan ergonomis.

Sistem Elektrik dan Penggerak Motor

Sistem elektrik merupakan rangkaian komponen yang berfungsi mengubah energi listrik menjadi energi mekanik atau bentuk energi lain. Dalam konteks mekatronika, penggerak motor (motor *drive*) adalah subsistem yang mengontrol performa motor listrik, meliputi kecepatan, torsi, dan arah putaran. Sistem ini terdiri dari sumber energi (AC/DC), kontroler (seperti VFD, PWM driver), motor listrik (DC, AC, *stepper, servo*), serta proteksi dan sensor untuk umpan balik. Integrasi semua elemen tersebut memungkinkan motor bekerja presisi, efisien, dan andal pada berbagai aplikasi industri maupun otomasi.

Jenis motor listrik utama mencakup:

Motor DC, unggul dalam kontrol kecepatan dan digunakan pada aplikasi yang membutuhkan torsi awal besar maupun kecepatan variabel.

Motor AC, terutama motor sinkron dan induksi, dipakai untuk aplikasi berdaya besar dan sistem industri.

Motor *Stepper*, bergerak dalam langkah tetap (*step*) sehingga cocok untuk kontrol posisi presisi, misalnya CNC dan printer 3D.
Motor *Servo*, bekerja dengan sistem umpan balik (*closed loop*) untuk mengontrol posisi dan kecepatan dengan sangat akurat.
Setiap jenis motor memiliki prinsip kerja, konstruksi, dan karakteristik berbeda. Motor DC misalnya bekerja berdasarkan gaya Lorentz, motor AC berdasarkan induksi elektromagnetik, sementara stepper memanfaatkan pulsa listrik untuk menghasilkan langkah, dan *servo* menggunakan *feedback encoder* untuk presisi.
Dalam pengendaliannya, sistem kelistrikan motor membutuhkan driver motor, teknik PWM, serta rangkaian proteksi (*overcurrent, overvoltage, overheating, short circuit*). Penggunaan inverter atau *Variable Frequency Drive* (VFD) sangat penting dalam motor AC tiga fasa untuk mengatur kecepatan dan torsi secara fleksibel sekaligus menghemat energi dan memperpanjang umur peralatan.
Secara keseluruhan, sistem elektrik penggerak motor menjadi tulang punggung otomasi modern. Integrasi antara motor, kontroler, proteksi, dan inverter menjadikan sistem ini tidak hanya efisien dan presisi, tetapi juga aman dan dapat diandalkan untuk mendukung kebutuhan industri 4.0.

Sensor dan Sistem Akuisisi Data

Sensor berfungsi mendeteksi perubahan variabel fisik atau kimia, kemudian mengubahnya menjadi sinyal listrik yang dapat diolah oleh sistem elektronik. Kinerja sensor ditentukan oleh akurasi, presisi, sensitivitas, resolusi, dan waktu respon, sehingga pemilihan sensor yang tepat sangat memengaruhi keandalan sistem.
Sistem akuisisi data bertugas mengumpulkan, mengubah, menyimpan, dan menampilkan data dari sensor agar dapat dianalisis dan dikendalikan. Komponen utamanya meliputi sensor/transduser, pengkondisi sinyal, ADC, unit pemrosesan, dan perangkat lunak. Terdapat beberapa jenis DAQ, seperti standalone, terintegrasi dengan PC, berbasis mikrokontroler, dan berbasis wireless.
Kalibrasi dan validasi menjadi langkah penting untuk menjaga akurasi hasil pengukuran. Dengan kemajuan IoT, kecerdasan buatan, dan teknologi digital, sensor dan DAQ kini semakin cerdas, adaptif, serta

banyak diaplikasikan di bidang industri, kesehatan, transportasi, pertanian, dan energi terbarukan. Perkembangan ini menjadikan sensor dan DAQ sebagai fondasi utama inovasi dan otomatisasi di era transformasi digital.

Sistem Kontrol dan Mikrokontroler

Sistem kontrol otomatis berfungsi menjaga variabel proses seperti suhu, tekanan, posisi, atau kecepatan agar sesuai dengan nilai setpoint. Kinerja sistem biasanya diukur dengan parameter seperti *rise time, overshoot, settling time,* dan *steady-state error*. Dengan penerapan kontrol otomatis, proses produksi dapat berjalan lebih stabil, efisien, dan konsisten dengan intervensi manusia yang minimal.

Terdapat tiga pendekatan utama dalam kontrol, yaitu *On-Off*, PID, dan logika kontrol. Kontrol PID (*Proportional, Integral, Derivative*) lebih kompleks dan paling banyak digunakan di industri karena mampu meningkatkan stabilitas, kecepatan respon, dan akurasi. Sementara itu, logika kontrol terdiri dari logika Boolean yang berbasis biner serta logika Fuzzy yang menggunakan derajat keanggotaan (0–1) untuk menangani ketidakpastian, cocok untuk sistem yang lebih kompleks seperti AC pintar atau mesin cuci otomatis.

Selain konsep kontrol, dibahas pula peran mikrokontroler dan PLC sebagai pusat pemrosesan sistem. Mikrokontroler (Arduino, NodeMCU, ESP32) bersifat fleksibel, murah, dan sesuai untuk prototipe serta IoT. PLC (*Programmable Logic Controller*) lebih tangguh dan handal, digunakan dalam industri berskala besar dengan pemrograman standar seperti *Ladder* Diagram dan FBD.

Diagram kontrol, wiring, dan interface pengguna. LCD, tombol, serta HMI (*Human Machine Interface*) juga penting, mempermudah operator dalam pemantauan dan pengendalian. Contoh penerapannya adalah panel kontrol mesin cetak pakan yang memungkinkan operator memantau suhu, status motor, serta mengendalikan operasi mesin secara langsung.

Implementasi Mesin Cetak Pakan

Desain mesin cetak pakan sebagai penerapan mekatronika untuk meningkatkan efisiensi produksi pakan ternak. Mesin ini mengintegrasikan komponen mekanik (*hopper, screw, roller, die, cutter*), elektrik (motor, sensor, *heater*, panel kontrol), dan rencana pengembangan sistem kontrol (mikrokontroler/PLC, sensor suhu, kelembapan, serta aktuator) sehingga proses produksi pakan berlangsung otomatis dan konsisten.

Proses produksi meliputi persiapan bahan baku, penggilingan, pencampuran, pengkondisian, pencetakan, pengeringan, hingga pengemasan. Otomatisasi didukung oleh sensor kelembapan, kendali suhu extruder, pengendali motor *screw* dan pisau pemotong, serta antarmuka pengguna (UI). Prototipe diuji modul per modul, mencakup uji sensor, motor, pemanasan, dan kontrol. Hasil uji menunjukkan mesin mampu menghasilkan pelet berukuran seragam (3–5 mm), kapasitas produksi ±200–300 kg/hari, serta konsumsi energi yang efisien.

Kelebihan prototipe terletak pada biaya rendah, kemudahan perakitan, stabilitas suhu dan kelembapan, serta konsistensi ukuran pelet. Namun, kelemahannya adalah kapasitas masih terbatas dan belum terintegrasi sistem kontrol. Potensi pengembangan meliputi integrasi IoT, penggunaan material tahan karat, pencampuran otomatis berbasis sensor berat, serta penerapan energi terbarukan seperti panel surya.

SOAL EVALUASI

Konsep Dasar Mekatronika

1. Jelaskan dengan kata-kata sendiri pengertian mekatronika dan ruang lingkupnya.
2. Sebutkan masing-masing satu contoh peran teknik mesin, elektro, dan informatika dalam sistem pengisi botol otomatis.
3. Buatlah diagram blok sistem pengontrol suhu ruangan berbasis sensor dan kipas. Jelaskan cara kerjanya.
4. Jelaskan 3 contoh penerapan mekatronika dalam industri pangan dan bagaimana sistem tersebut bekerja.
5. Mengapa penting bagi mahasiswa teknik memahami integrasi multidisiplin dalam sistem mekatronika? Jelaskan manfaatnya untuk masa depan industri.

Komponen Mekanik Dalam Sistem Mekatronika

1. Jelaskan perbedaan antara mesin pembakaran dalam (ICE) dan mesin pembakaran luar (ECE).
2. Sebutkan kelebihan dan kekurangan transmisi roda gigi lurus.
3. Mengapa kopling fluida banyak digunakan pada kendaraan berat?
4. Bagaimana prinsip kerja *screw conveyor* dalam memindahkan material?
5. Sebutkan kriteria pemilihan material rangka mesin cetak pakan.
6. Jelaskan perbedaan antara transmisi menggunakan *gear* dan sabuk. Kapan masing-masing lebih cocok digunakan?
7. Jelaskan sistem kerja *screw conveyor* dan sebutkan kelebihan serta kekurangannya.
8. Sebuah extruder memerlukan torsi 12 Nm untuk mendorong pakan. Jika radius screw 0,08 m, berapa besar gaya dorong yang dibutuhkan?

9. Pilih bahan yang sesuai untuk *hopper* mesin pencetak pakan otomatis dan jelaskan alasan teknisnya.

Sistem Elektrik dan Penggerak Motor

1. Jelaskan perbedaan prinsip kerja motor DC dan AC.
2. Gambar dan jelaskan rangkaian dasar pengendali motor DC menggunakan PWM.
3. Apa fungsi inverter dalam sistem motor AC dan bagaimana pengaruhnya terhadap kecepatan putar motor?
4. Sebuah screw conveyor memerlukan torsi sebesar 10 Nm pada kecepatan 100 rpm. Tentukan jenis motor yang sesuai dan bagaimana Anda akan mengintegrasikannya ke sistem mekanik.
5. Dalam sistem mesin cetak pakan otomatis, motor apa yang paling sesuai untuk digunakan pada pengaduk material? Jelaskan alasan pemilihan Anda.

Sensor dan Akuisisi Data

1. Jelaskan fungsi masing-masing komponen utama dalam sistem DAQ!
2. Apa perbedaan antara sistem DAQ standalone dan yang terintegrasi dengan PC?
3. Sebutkan tiga keuntungan penggunaan sistem DAQ berbasis IoT!
4. Bagaimana prinsip kerja DAQ dalam mengubah data fisik menjadi digital?
5. Sebutkan dan jelaskan dua tantangan umum dalam pengembangan DAQ dan cara mengatasinya!
6. Jelaskan peran ADC dalam sistem akuisisi data.
7. Apa fungsi kondisioner sinyal dalam sistem DAQ?
8. Berikan contoh aplikasi DAQ dalam bidang lingkungan!
9. Bandingkan sistem DAQ berbasis mikrokontroler dengan DAQ profesional dari segi kelebihan dan kekurangannya.

Sistem Kontrol dan Mikrokontroler

1. Sebutkan empat parameter kinerja utama dalam evaluasi sistem kontrol otomatis!
2. Jelaskan perbedaan utama antara logika Boolean dan logika Fuzzy.
3. Sebutkan dua contoh aplikasi kontrol PID dalam industri.
4. Apa keunggulan utama PLC dibandingkan mikrokontroler dalam aplikasi industri?
5. Sebutkan contoh perangkat antarmuka pengguna (user interface) dalam sistem kontrol berbasis mikrokontroler.
6. Jelaskan prinsip kerja kontrol On-Off dan berikan contoh aplikasinya dalam kehidupan sehari-hari.
7. Gambarkan diagram blok kontrol PID dan jelaskan fungsi masing-masing komponennya.
8. Bandingkan kelebihan dan kekurangan mikrokontroler (misalnya Arduino) dengan PLC dalam sistem kontrol.
9. Berikan contoh aturan logika Fuzzy (*IF–THEN Rule*) untuk sistem kipas otomatis berbasis suhu dan kelembapan.
10. Jelaskan peran HMI dalam sistem kontrol mesin cetak pakan serta manfaatnya bagi operator.

Implementasi Mesin Cetak Pakan Otomatis

1. Jelaskan proses kerja utama dalam mesin cetak pakan otomatis.
2. Gambar diagram blok sistem mesin cetak pakan dan identifikasi sensor dan aktuator utama.
3. Sebutkan tiga parameter performa yang diuji dalam prototipe dan metode pengujiannya.
4. Apa keuntungan penggunaan mikrokontroler dibandingkan sistem manual dalam sistem pakan?
5. Rancang konsep prototipe mesin cetak pakan versi Anda sendiri untuk kapasitas skala rumah tangga.

DAFTAR PUSTAKA

Achmad F., Rusimamto PW., Shalma Z. *SimuRelay*. Penerbit KNM Indonesia. Yogyakarta;2025.

Achmad, Z. *Elemen Mesin 1*. Bandung: Refika Aditama. 1999.

Aditya AW, Ihsan I, Utomo RM, Hilmansyah H. Evaluasi Motor Listrik Sebagai Penggerak Mobil Listrik. *JRST (Jurnal Riset Sains dan Teknologi)*. 2019 Sep 30; 3(2):55-9.

Afandi DA, Andrijani Sumarahinsih, Abd. Rabi. Perancangan Prototipe Alat Monitoring Ketinggian Air Sawah Berbasis LoRA dengan Arduino Cloud. *JE-Unisla* [Internet]. 2024 Sep 5; 9(2):159–68..

Ahing YM, Sumarahinsih A, Gumilang YSA. Design of Filterization Monitoring System in Household Wastewater Treatment using IoT Based PID Method. *Blend SainsJTek* [Internet]. 2025 Jan 30; 3(2):153–68.

Aiyub S, Habibi MG, Fauzi F. Studi Efisiensi Sistem Reduction Gear pada Pembangkit Listrik Tenaga Gas. *Jurnal Teknologi*. 2022 Oct 29; 22(2):78-86.

Akbar MZ, Riady SR. Sistem Akuisisi Dan Monitoring Performa Mesin Produksi Berbasis Internet of Things (IoT) Dengan Metode Logging Data. Jurnal Mahasiswa Bina Insani. 2022 Jul 28;7(1):55-64.

Ambabunga Y. Peningkatan Effisiensi Kerja Motor Induksi 3 Phasa (Pengujian Karakteristik Motor Induksi 3 Phasa). *J Dyn Saint*. 2020; 5(1):884–9.

Anaam IK, Hidayat T, Pranata RY, Abdillah H, Yhuto A, Putra W. Pengaruh trend otomasi dalam dunia manufaktur dan industri. *Vocat Educ Natl Semin VENS*. 2022; 01(01):46–50;

Anantajaya IMRA, Kumara INS, Divayana Y. Review: Aplikasi Sensor Pada Sistem Monitoring dan Kontrol Berbasis Mikrokontroler Arduino. J *SPEKTRUM* [Internet]. 2022 Jan 8; 8(4):171.

Anthony Z. *Mesin Listrik Arus Bolak-balik*. Edisi Revisi. Penerbit Andi; 2020.

Antonnius A, Afdal A, Mukhnizar M, Abu R, Azman A. Perencanaan Mesin Tempa Logam Dengan Sistem Forging Hammer. *Jurnal Teknik, Komputer, Agroteknologi Dan Sains*. 2022 Nov 18; 1(2):163-74

Apripriharta A. Kendali Motor Induksi Menggunakan Variable Speed Drive. *J Kaji Tek Elektro*. 2023;8(1):1–6.

Aryza S, Novelan MS. *Mekatronika: Integrasi, Kontrol dan Sistem*. Serasi Media Teknologi; 2025 Mar 18.

Asrul, A., Assiddiq, H., & Zaki, K. A. M. Rancang Bangun Alat Pemberi Pakan Ikan Otomatis Berbasis Arduino Uno. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 2024; 12(1), 11-18.

Asyari, S., Leksono, J. W., Kholis, N., & Indahwati, E. Rancang Bangun Sistem Pakan Dan Pengontrol Suhu Otomatis Berbasis Internet of Things (IoT). *Elconika: Jurnal Teknik Elektro*, 2023; *2*(1), 42-48.

Athani VV. *Stepper motors: fundamentals, applications and design*. New Age International; 1997.

Baharuddin B. *Sistem Kendali Kecepatan Motor DC berbasis PWM (Pulse width Modulation)*. Uniniversitas Hasanuddin; 2012.

Banggut ALF, Setiawan AB, Sumarahinsih A. Monitoring Suhu pada Tanaman Seledri berbasis Internet of Things dengan Metode Fuzzy Sugeno. *JASEE J Appl Sci Electr Eng*. 2023; 4(01):37–47.

Bedretchuk JP, Arribas García S, Nogiri Igarashi T, Canal R, Wedderhoff Spengler A, Gracioli G. Low-cost data acquisition system for automotive electronic control units. *Sensors* 2023, *23*(4), 2319; https://doi.org/10.3390/s23042319

Berahim H. *Pengantar Teknik Tenaga Listrik*. Ed Pertama, Andi Offset Yogyakarta. 1991.

Berahim H. *Pengantar Teknik Tenaga Listrik Teori Ringkas dan Penyelesaian Soal*. Yogyakarta, Andi Offset; 1994.

Bianculli AJ. Stepper motors: application and selection. *IEEE Spectr*. 2009; 7(12):25–9.

Bishop RH, *ISA--The Instrumentation, Systems, and Automation Society*, editors. The mechatronics handbook. Boca Raton, Fla: CRC Press; 2002. 1 p. (The electrical engineering handbook series).

Bolton, W. *Mechatronics: Electronic Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering*. 6th ed. New York: Pearson; 2015.

Bukhari ES, Indra Mawardi, Ariefin, Fakhriza. *Mekatronika dalam Industri Manufaktur*. Cet.ke-1. Yogyakarta: CV. Andi Offset.; 2023.

Cahyono, Eko Aris Budi, Pippie Arbiyanti, Agus Siswoyo, Dian Artanto, Antonius Hendro Noviyanto, Eko Arianto. *Dasar-Dasar Mekatronika: Konsep, Sistem, dan Aplikasi*. Jakarta: PT Bukuloka Literasi Bangsa; 2025

Can A, Isranuri I. Analisa Getaran Poros Pompa Sentrifugal pada Sistem Penyambungan Kopling Sabuk dengan Variasi Dimensi Ukuran Tebal dan Lebar Sabuk. *Otopro*. 2024 Nov 26; 20(1):24-30.

Channi, H. K. (2024). Role of Data Acquisition, Sensors, and Actuators in Mechatronics Industry. Book Editor. Chapter 3. *Computational Intelligent Techniques in Mechatronics*, 83-107; https://doi.org/10.1002/9781394175437.ch3

Choerullah AI, Anjani RD, Suci FC. Analisis perhitungan poros, pulley dan V-belt pada sepeda motor Honda Vario 125CC 2018. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*. 2022 Jun 2; 8(8):1-3.

Chu C, Yin C, Su S, Chen C. Synchronous Integration Method of System and Simulation Models for Mechatronic Systems Based on SysML. *Machines* [Internet]. 2022 Sep 27; 10(10):864.

Darto D, Suprapto A, Dirgantara W. Pendampingan Penerapan IoT untuk Monitoring dan Kontrol Listrik untuk Petani Hidroganik Desa Kanigoro Malang. *Abdimas J Pengabdi Masy Univ Merdeka Malang* [Internet]. 2021 Aug 4; 6(3):315–25.

Doebelin EO. Measurement Systems: Application and Design–McGraw-Hill. Quarta Edição. 1990.

Efrizal E, Sabar M. Analisa Perancangan Transmisi Sprocket and Chain Pada Kendaraan Prototype Bensin Kontes Mobil Hemat Energi (KMHE) Menristekdikti UMT. *Motor Bakar: Jurnal Teknik Mesin*. 2020 Sep 12; 3(1):1-7.

Elfina, S., Arifin, M., Syafri, E., & Azharman, Z. Rekayasa Mesin Pembuat Pelet Pakan Ikan untuk Meningkatkan Efisiensi Produksi. *Agroteknika*, 2025); 8(1), 65-77.

Elnemr, Y. E., Abu-Libdeh, A., Raj, G. C. A., Birjis, Y., Nazemi, H., Munirathinam, P., & Emadi, A. (2023). Multi-transduction-mechanism technology, an emerging approach to enhance sensor performance. *Sensors* 2023, 23(9), 4457; https://doi.org/10.3390/s23094457

Erari IS, Muslimin AM. Variasi Kuat Medan Magnet Dan Daya Listrik Input Terhadap Karakteristik Motor Listrik Dc Dua Kutub. *J Nat*. 2021; 17(1):37–49.

Fandiansyah CT, Hadi MokhS, Kartikasari RSD. Purwarupa Sistem Kendali Jarak Jauh Smart Room Berbasis Smartphone. *JASIEK J Apl Sains Inf Elektron Dan Komput* [Internet]. 2022 Jun 14; 4(1):41–54.

Fathoni Moh. A, Dirgantara W, Sumarahinsih A. Kontrol Temperatur Tungku Berbasis Microcontroller pada Proses Destilasi Daun Syzygium Aromaticum dengan Metode Fuzzy Logic. *Blend Sains J Tek* [Internet]. 2024 Aug 9; 3(1):102–19..

Fathoni, Moh Alif, Wahyu Dirgantara, and Andrijani Sumarahinsih. "Kontrol Temperatur Tungku Berbasis Microcontroller pada Proses Destilasi Daun Syzygium Aromaticum dengan Metode Fuzzy Logic." *Blend Sains Jurnal Teknik*. 2024; 3(1):102-119.

Fraden J. Handbook of Modern Mensors: physics, designs, and applications. New York, NY: Springer International Publishing Switzerland; 2016. ISBN 978-3-319-19303-8 (eBook) DOI 10.1007/978-3-319-19303-8

Gouiza, N., Jebari, H., & Reklaoui, K. Integration of iot-enabled technologies and artificial intelligence in diverse domains: Recent advancements and future trends. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 15th March 2024; 102(5):1975-2029.

Gu, L., & Qian, C. The application of smart wearable devices in the detection of sports energy consumption: A review. *Intelligent Sports and Health*, April 2025, *1*(2):67-78; https://doi.org/10.1016/j.ish.2025.04.001

Guan, K., Shao, M., & Wu, S. A remote health monitoring system for the elderly based on smart home gateway. *Journal of healthcare engineering*, 24 Oct *2017*(1), 5843504; https://doi.org/10.1155/2017/5843504

Gumilang YSA, Rozaq A, Sonalitha E, Rabi A, Sumarahinsih A, Krisdianto, et al. Pengenalan dan Pelatihan Robot Lego pada Siswa Sekolah Menegah Pertama Sebagai Implementasi Pembelajaran STEM di Sekolah. *Int J Community Serv Learn* [Internet]. 2023 Jun 27; 7(2):185–91.

Hadiputranto R, Malik MI. Meningkatkan Pemahaman Teknik Mekatronika di Sekolah: Program Pengabdian Masyarakat di SMK Igasar Pindad Tasikmalaya. *J Pengabdi Masy PIMAS*. 2024 Nov;3(4):257–62.

Halim, Ir Levin. *Pendahuluan Energi Dan Daya: Sistem Tenaga Listrik*. Nas Media Pustaka, 2025.

Harahap MR, Yuliandi RB, Sundari E, Tafrant D. Pengaruh Variasi Tekanan Dan Penambahan Unsur Magnesium Terhadap Pengecoran Aluminium Pada Kopling Perahu Motor. *Machinery Jurnal Teknologi Terapan*. 2024 Jun 30; 5(2):73-80.

Hardani DNK. Analisis Torsi dan Efisiensi pada Motor Induksi Tiga Fasa Rotor Sangkar. *Techno (Jurnal Fak Tek Univ Muhammadiyah Purwokerto)*, 2018; 19(2):79–86

Haris O, Anwar S, Tutupoly PK. Analisa Kegagalan Rubber Coupling Pada Poros Pompa Air Side Seal Oil Generator Unit 1 PLTU Pelabuhan Ratu. *Jurnal Mema (Jurnal Mesin dan Manufaktur)*. 2024 Oct 30; 1(1):19-31

Hidayat, Arief Rahman, et al. Pemodelan Identifikasi Sistem untuk Pengaturan Kecepatan Motor DC dengan Kontrol PID. *Jurnal Elektronika dan Otomasi Industri*, 2024, 11.1: 253-262.

Hidayat, Darmawan, et al. Simulasi Pengontrol On/Off pada Sistem Kendali Umpan Balik dengan Model Fisis Elektronik. *TELKA-Jurnal Telekomunikasi, Elektronika, Komputasi dan Kontrol*, 2018, 4.1: 43-53

Hidayat AW, Ramdani R. Rancang Bangun Transmisi Pada Poros Mesin Pelontar Pakan Ikan Otomatis. *Jurnal Mahasiswa Terapan*. 2024 Oct 31; 1(1):237-47.

Hunter, G. W., Stetter, J. R., Hesketh, P., & Liu, C. C. Smart sensor systems. *The Electrochemical Society Interface*, 2010, *19*(4), 29. DOI 10.1149/2.F03104if

Ibrahim AW, Widodo TW, Supardi TW. Sistem Kontrol Torsi pada Motor DC. *IJEIS*. 2016 Apr; 6(1):93-104.

Ikram FD, Hidayat A, Anggara M. Perancangan Transmisi Pulley Dan V-Belt Pada Mesin Chipper Kayu. *Jurnal Gear : Energi, Perancangan, Manufaktur & Material*. 2024 Jan 21; 2(1):60-70.

Irawan AP. *Perancangan Sistem Transmisi Roda Gigi*. Yogyakarta. PT Kanisius; 2016. ISBN 978-979-21-4993-7.

Jaelani, A. *Proses Produksi dan Uji Kualitas Fisik pada Industri Pakan*. Zuxzes Express, Banjarbaru, 2021.

Jafier SG. Besarnya Kapasitas Kerja Screw Conveyor Untuk Mendorong Brondolsn Dari Threser Menuju Digester Pada PT X. *Jurnal Vokasi Teknik*. 2025 Jan 13; 3(1):1-5.

Jaya H, Abd Djawad MY, Saharuddin ST, Suhaeb SS, Idhar AM. Embedded System And Robotics. Buku Ajar. Universitas Negeri Makassar. 2017

Kurniawan P, Darto D, Iswantoko A, Sutrisno F. Simulation of Stress Intensity Factor and J-Integral on UIC 54 Railway Failure Using A Fracture Mechanics Approach. *Eng Innov* [Internet]. 2024 Jun 26; 11:1–8.

Lakhmi, R., Fischer, M., Darves-Blanc, Q., Alrammouz, R., Rieu, M., & Viricelle, J. P. Linear and non-linear modelling methods for a gas sensor array developed for process control applications. *Sensors* 2024, 24(11), 3499;

Li M, Ma Y. Parameter identification of DC motor based on compound least square method. In: *2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*. IEEE; 2020. p. 1107–11.

Lu J. Application of PLC control technology in intelligent automatic control. In2022 IEEE Asia-Pacific Conference on Image Processing, Electronics and Computers (IPEC) 2022 Apr 14 (pp. 1166-1169). IEEE

Mahendra R, Hiendro A. Analisis Pengaruh Pembebanan Terhadap Efisiensi dan Umur Transformator Pada PLTU Bengkayang 2 x 50 MW

PT. PLN (Persero) UPK Singkawang. *Journal of Electrical Engineering, Energy, and Information Technology (J3EIT)*. 2022; 11(1).

Manurung JH, Warman E. Analis Slip Optimal Motor Induksi Tiga Fasa untuk Efisiensi Optimal pada Beban Rendah. *Singuda Ensikom*. 2013;3(3):100–5.

Molina A, Vargas D, Rodas A. Implementation of A Data-Acquisition System and Its Cloud-Based Registration Using the Unified Architecture of Open Platform Communications. *Eng. Proc.* 2023, *47*(1), 20.

Mulyadi R, Darto D, Iswantoko A. The Effectiveness of Centrifugal Pump Shaft Alignment Process Against Vibration Reduction. *TRANSMISI*. 2022; 18(2):55–60.

Naim M. *Buku Ajar Sistem Kontrol dan Kelistrikan Mesin*. Penerbit NEM; 2021.

Nalaprana Nugroho dan Sri Agustina. Analisa Motor DC (Direct Current) Sebagai Penggerak Mobil Listrik. *Mikrotiga*, 2015: 2(1):28-34.

Narainsamy, Y., & Jacobsz, S. W. Evaluating the performance of three sensor types for long-term measurement of suctions in gold tailings. In *E3S Web of Conferences* (2023, Vol. 382, p. 16006). EDP Sciences.

Nubly MH, Yudo H, Kiryanto K. Analisa Kekuatan Coupling pada Kapal Inspeksi Perikanan SKIPI Kelas ORCA menggunakan Metode Elemen Hingga. *Jurnal Teknik Perkapalan*. 2017; 5(4):671-677.

Nugraha, MA., Kardiman, Oleh. Perancangan Roda Gigi Miring Pada Transfer Case Jimmy. *Jurnal Serambi Engineering* [Internet]. 2024 Juli 11; 9(3):9827-34

Nugroho ME, Tutuka R. Pengaruh Kecepatan Screw, Feeder, dan Temperatur Pemanas terhadap Proses Ekstrusi Bijih Plastik Daur Ulang Menggunakan Mesin Extruder. *Jurnal Penelitian Inovatif*. 2025 Jun 1; 5(2):1467-74.

Nugroho N, Agustina S. Analisa motor DC (Direct Current) sebagai penggerak mobil listrik. *Mikrotiga*, 1 Januari 2015; 2(1):28-34.

Nugroho DH, Pramito AIA. *Sistem Utilitas*. Penerbit Widina, 2025.

Nugroho G, Norcahyo R. *Mekatronika Pendekatan Praktis*. Yogyakarta: UGM PRESS, 2024.

Nuhgraha, Y. A., & Irawan, A. S. Perancangan Kelistrikan Mesin Pemberi Pakan Ikan Otomatis Menggunakan Arduino Berbasis IoT. *Jurnal TEDC*, 2024; 18(1), 33-39.

Ogata K. Modern control engineering. Prentice hall; 2010.

Onwubolu GC. *Mechatronics: principles and applications*. Amsterdam ; Boston: Elsevier Butterworth-Heinemann; 2005. 645 p.

Osman N, Khalid HM, Tha'er OS, Abuashour MI, Muyeen SM. A PV powered DC shunt motor: Study of dynamic analysis using maximum power Point-Based fuzzy logic controller. *Energy Convers Manag X*. 2022; 15:100253.

Pandang MS, Nachrowie N, Sari RDJK. Prototype Kendali Arus dan Tegangan Menggunakan Internet of Things (IoT). *Blend Sains J Tek* [Internet]. 2023 Oct 4; 2(2):191–7.

Pangalinan A, Yokasing YB. Perancangan dan Pembuatan Mekanisme Ubah Gerak Rotasi Menjadi Translasi. *Jurnal Teknik Mesin*. 2018 Dec 8; 1(2):95-101.

Park M-H, Won C-Y. Time optimal control for induction motor servo system. *IEEE Trans Power Electron*. 1991; 6(3):514–24.

Patonra AH, Masita S, Wibowo NR, Fitriati A. Rancang Bangun Media Pembelajaran Praktik Motor Stepper. *Mechatronics J Prof Entrep*. 2020; 2(1):7–11.

Peng FZ. Z-Source Inverter. *IEEE Trans Ind Appl*. 2003; 39(2):504–10.

Prabowo NK, Paristiowati M, Irwanto I. Arduino-based real-time data acquisition systems: Boosting STEM career interest. International Journal of Evaluation and Research in Education (IJERE). 2024;13(4):2316

Pramudita R, Putra Ramadhan MA, Ashari MR, Nafisa RA, Rahmawati DN. Analisis Dampak Otomasi Industri terhadap Efisiensi Operasional dan Optimasi Konsumsi Energi. *J Ilm Teknol Infomasi Terap* [Internet]. 2024 Dec 16; 11(1).

Prastika I, Wigraha NA, Nugraha INP. Pengaruh perubahan bentuk squish (sudut kepala silinder) terhadap torsi dan daya pada sepeda motor konvensional. *J Tek Mesin Univ Pendidik Ganesha*. Desember 2018; 6(3):176-181.

Putra RP, Samsurizal S, Pahiyanti NG. Desain Sistem Kontrol Penggerak Mula Generator Magnet Permanen PLTMH Menggunakan Planetery Gear . *Kilat*. 2018 Nov 20; 7(2):149-59.

Radia MA, El Nimr MK, Atlam AS. IoT-based wireless data acquisition and control system for photovoltaic module performance analysis. e-Prime-Advances in Electrical Engineering. *Electronics and Energy*. 2023 Dec 1;6:100348.

Ramadhan, M. H., Sulaiman, S., & Putra, I. E. Pembuatan Sistem Penggerak Mesin Cetak Pelet Ikan. *Jurnal Teknologi dan Vokasi*, 2025; *3*(1), 57-63.

Regtien, Paul PL, and Edwin Dertien. *Sensors for mechatronics*. Elsevier, 2018

Rianna M, Humaidi S, Sembiring T. *Buku Ajar Material Listrik dan Magnetik*. Guepedia. November 2023.

Ross D, Darto D, Iswantoko A, Kurniawan P. Implementation of Group Technology in The Manufacturing Process of Disk Mill Machine. *TRANSMISI*. 2024;20(1):34–44.

Rozaqi, A. H. A., Winangsit, A., Putra, B. M., Khaq, B., Rohmandani, F., Santoso, A. D., & Fahrizi, M. F. Mesin Pencetak Pelet Vertikal dengan Mini Conveyor. *Manutech: Jurnal Teknologi Manufaktur*, 2023; 15(02), 222-228.

Ruviana R, Izzah AN, Faizin AK. Analisis Sistem Dinamis pada Mesin Pengayak Pasir Tipe Vibrating Screen. *Creative Research in Engineering (CERIE)*. 2025 Jul 31;5(2):1-7.

Ryalat M, Franco E, Elmoaqet H, Almtireen N, Al-Refai G. The Integration of Advanced Mechatronic Systems into Industry 4.0 for Smart Manufacturing. *Sustainability* [Internet]. 2024 Sep 29; 16(19):8504.

Sadi, Sumardi. "Implementasi Human Machine Interface pada Mesin Heel Lasting Chin Ei Berbasis Programmable Logic Controller. *Jurnal Teknik* 2020;9.1.

Salamone, F., Masullo, M., & Sibilio, S. Wearable devices for environmental monitoring in the built environment: a systematic review. *Sensors* 2021, 21(14), 4727.

Sari RDJK, Arief YC, Suryono S. Rancang Bangun Elektronik Motor Relay sebagai Proteksi Berbagai Gangguan Motor Listrik. *JASIEK (Jurnal Apl Sains, Informasi, Elektron dan Komputer)*. 2022; 4(2):67–78.

Sari RDJK, Hasanah RN, Wijono W. Power Factor Improvement of The Glenmore Sugar Industry Electrical System. *J Sci Appl Eng* [Internet]. 2022 Mar 15; 5(1):20.

Sari RDJK, Arief YC, Suryono S. Rancang Bangun Elektronik Motor Relay sebagai Proteksi Berbagai Gangguan Motor Listrik. *JASIEK J Apl Sains Inf Elektron Dan Komput* [Internet]. 2022 Dec 28; 4(2):67–78.

Sari RDJK, Murdianto A. Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Skala Industri Berbasis PVsyst. *JEECOM J Electr Eng Comput*. 2023;20(xx):171–9.

Sari RDJK, Gumilang YSA, Zidane FM, Saputra AY. Smart Portable Counter Sebagai Sistem Otomatis Penghitungan Inventory Pada Gudang Gula. *J Electr Eng Comput JEECOM*. 2024;6(1):77–84.

Schneider N, Ruf P, Lermer M, Reich C. ARTHUR: Machine Learning Data Acquisition System with Distributed Data Sensors. InCLOSER 2023 (pp. 155-163).

Schock C, Dumler J, Döpper F. Data Acquisition and Preparation–Enabling Data Analytics Projects within Production. Procedia CIRP. 2021 Jan 1;104:636-40.

Sebastian R, Darto D, Natalia D, Saputro H, Winingsih PH. ELCO (Electrical Control) Sebagai Solusi Peningkat Daya Listrik Rumah Tangga. *Compton J Ilm Pendidik Fis*. 2020; 7(1):1–7.

Setiaji A, Sumarahinsih A, Subairi S. Purwarupa Robot Pipe Following Pendeteksi Kebocoran Gas Internet of Things Berbasis Web dan Aplikasi Android. *JASIEK J Apl Sains Inf Elektron Dan Komput* [Internet]. 2022 Jun 14; 4(1):29–40.

Sibarani M, Allan MP, Santika PM. Perancangan Unit Extruder Pada Mesin extrusion lamination flexible packaging. *Jurnal Teknik Mesin*. 2018 Aug; 2(2):33-9

Silaban FA, Budiyanto S, Raharja WK. Stepper motor movement design based on FPGA. Int J Electr Comput Eng. 2020;10(1):151.

Singh S, Verma K, Singh J, Tiwari N. A Review on control of a brushless DC motor drive. Int J Futur Revolut Comput Sci Commun *Eng*. 2018; 4:82–97.

Siregar ZH, Jufrizal J, Putra BK. Pengaruh penambahan regenerator terhadap performansi mesin stirling tipe gamma. *Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi Dan Teknologi*. 2022 Oct 15; 8(2):194-201.

Sochib M, Putra AP. Perancangan Mesin Pencacah Pakan Ternak Serbaguna dengan Kapasitas 300 kg/jam. *Wahana Teknik*. 2019 Jun 14; 8(1):16-26.

Soebyakto S, Edward T, Wibowo A, Shidiq MA. Sistem Transfer Daya Dari Dua Jenis Mesin Yang Berbeda. *Mestro: Jurnal Teknik Mesin dan Elektro*. 2023 Mar 17; 4(03):5-11.

Styks, J., Wróbel, M., Frączek, J., & Knapczyk, A. Effect of Compaction Pressure and Moisture Content on Quality Parameters of Perennial Biomass Pellets. *Energies*, 2020, 13(8), 1859; doi:10.3390/en13081859

Sukarman, S. Steam Dalam Pembuatan Pakan Untuk Komoditas Akuakultur. *Media Akuakultur*, 2010; 5(2), 123-128.

Sukma, H., Sulaksono, B., Prakoso, A. I. D. & Zeda, A. A. *Proses Manufaktur Mesin Pelet Pakan Ikan*. *Jurnal Ilmiah Ilmu dan Teknologi Rekayasa*, 2024; 7(1), 31–37.

Sularso. *Dasar Perencanaan dan Pemilihan Elemen Mesin*. Jakarta : PT. Pradnya Paramita. 2000.

Sumarahinsih A, Mahendra SAE, Nafsi MZD. Deteksi Kekeruhan untuk Memantau Kualitas Air Berbasis IoT. *TELKA*. 2023 May; 21: 74–83.

Supriadi D. Perancangan Transmisi Mesin Pencacah Pembuat Cipuk (Cireng Kerupuk). *Jurnal TEDC*. 2019; 13(1):82-7.

Suriadi I, Atmika KA. Perancangan rasio sistem transmisi kendaraan penggerak roda belakang untuk meningkatkan kinerja traksi. *Jurnal Energi dan Manufaktur*. 2016 Apr 1; 9(1):44-8.

Sutisna NA. Perhitungan Konveyor Sabuk Untuk Mengangkut Material Sandblasting Sebagai Pengganti Konveyor Ulir. *Rotasi*. 2021; 23(2):10-21

Syamsuar S, Wibawaningrum R, Makarim H. Cara Kerja dan Penggunaan Motor Direct Current (DC). *War Penelit Perhub*. 2011; 23(5):509–23.

Tahir, A., & Nurdjan, N. Konstruksi Mesin Pakan Ikan Otomatis. *Jurnal Vokasi Teknik Mesin dan Fabrikasi Logam*, 2023; 2(1), 54-63.

Tatiya, M., Choudhari, P., Suneel, A. S., Soni, S., Saxena, V., & Gore, R. D. Integration Of Smart Sensors, AI And Iot In Precision Agriculture: Advancing Crop Productivity And Sustainability. *International Journal of Environmental Sciences*, 2025; *11*(12s):255-272

Tohasan A, Prihastuty E, Yudisworo WD. Rear Wheel Drive Sprocket Gear Transmission Design for Electric car. Mestro: *Jurnal Teknik Mesin dan Elektro*. 2024 Jun 22; 6(01):18-21.

Tullah MH, Saputra YM, Fachruddin F, Utomo MP, Rahman FM. Rancang Bangun Perangkat Perekam Data Konsumsi Bahan Bakar Dan Rasio Udara-Bahan Bakar Digital Untuk Analisa Unjuk Kerja Mesin Bensin Pembakaran Dalam. *Jurnal Mekanik Terapan*. 2020 Nov 25; 1(2):152-8.

Umam, Faikul. Budiarto, Hairil. Dafid, Ach. *Motor Listrik*. Yogyakarta: Deepublish; 2017.

Umam F, Hairil Budiarto ST, Dafid A, Md A. *Motor Listrik*. Media Nusa Creative (MNC Publishing); 2021.

Urrea, C., & Garcia-Garcia, Y. Design and performance analysis of level control strategies in a nonlinear spherical tank. *Processes* 2023, 11(3),720.

Wardhana, Asepta Surya, Hana Amelinda Azizah, and Chalidia Nurin Hamdani. Pengujian Sistem Pengendalian Temperatur pada Prototipe Heat Exchanger Berbasis PID. *Jurnal Otomasi Kontrol dan Instrumentasi*, 2021;13(2): 81-91.

Webster, J.G., & Eren, H. (Eds.). *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook: Two-Volume Set* (2nd ed.). CRC Press.; 2014.

Wei X and Wei Y. Automatic control technology of mechanical equipment based on microelectronic sensor signal control. *Front. Mech. Eng*. 2025;11:1557863.

Wijanarko H, Lufti A. Perencanaan Ulang Roda Gigi Pinion Pada Gardan Belakang Kendaraan Jeep BJ-212. *Jurnal Mekanikasista*. 11 May 2025;12(2):127-41.

Wijaya AR, Mandasari RD, Rosano A. Analisis dan Optimasi Sistem Kontrol Robot Falcon Millenium: Automatic Robot Palletizer Menggunakan PLC Omron. Faktor Exacta. March 2024;17(1):69~76.

Witdarko, Y., Wahida, W., & Kaurum, O. Performance of Pig Feed Mixer Using Electric Motor Drive. *Agricola*, 2025; 15(2):224-230.

Yudha, HM. *Buku Ajar Penggunaan Motor Listrik*. Palembang: Pantera Publishing; 2020.

Tentang Penulis



Dr. Andrijani Sumarahinsih, ST., MT. Lahir di Malang pada tanggal 02 Agustus 1971 hingga menyelesaikan SMA, kemudian melanjutkan pendidikan sarjana Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya. Setelah menyelesaikan pendidikan S1, bekerja sebagai staf pengajar Prodi D3 Elektronika Jurusan Teknik Elektro di Politeknik Negeri Kupang. Pendidikan S2 Prodi Teknik Elektro (Sistem Kontrol Elektronika) dan S3 Fakultas Kedokteran Prodi Ilmu Kedokteran (Teknologi Kedokteran - Elektromedik) diselesaikan di Universitas Brawijaya. Saat ini, sebagai staf pengajar Prodi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Merdeka Malang.



Ir. Darto, ST., MT. Lahir di Malang pada tanggal 04 Juli 1973, menempuh pendidikan sarjana di Teknik Mesin Universitas Merdeka Malang, kemudian melanjutkan pendidikan tingkat magister di Institut Teknologi Bandung pada bidang kekhususan Teknik Produksi Pemesinan. Penulis berpengalaman dalam bidang komisioning mesin perkakas NC dan telah banyak berpengalaman dalam bidang tersebut. Penulis juga merupakan anggota Masyarakat Teknik Produksi Indonesia dalam bidang Pengetesan Mesin Perkakas. Dalam keseharian penulis juga bekerja sebagai pelaksana pengawas berbagai proyek gedung di bidang Mekanikal Elektrikal, dan mulai tahun 2007 sampai dengan sekarang telah bergabung dengan PT. Empat Pilar Konsultan yang berkedudukan di Surabaya. Di bidang pendidikan penulis pada saat ini menjabat sebagai Ketua Program Studi Teknik Mesin Universitas Merdeka Malang sedangkan dalam akademik penulis merupakan anggota Kelompok Bidang Keahlian Perangan dan Produksi dengan mengampu mata kuliah Teknologi CAD-CAM dan Pengantar Sistem Kendali.



Resi Dwi Jayanti Kartika Sari, A.Md., S.ST., MT. Lahir di Surabya pada tanggal 04 Mei 1987 dan dibesarkan di Malang hingga menyelesaikan SMA, kemudian melanjutkan pendidikan D3 di Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Listrik Politeknik Negeri Malang, dan D4 di Fakultas Teknik, Jurusan Elektronika Industri Politeknik Elektronika Negeri Surabaya (PENS-ITS). Penulis pernah bekerja di dunia industri, salah satunya di PT. SCHNEIDER ELECTRIC INDONESIA selama 5 tahun di bagian engineering. Pendidikan S2 diselesaikan di Teknik Elektro (Sistem Tenaga Listrik) Universitas Brawijaya. Saat ini,

sebagai staf pengajar Prodi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Merdeka Malang.



Agustin Widyastutik. Lahir di Berau, pada tanggal 31 Agustus 2003. Lulusan SMKN 1 Kepanjen dengan jurusan Teknik Kendaraan Ringan Otomotif. Saat ini sedang menempuh pendidikan sarjana pada Prodi S1 Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Merdeka Malang. Selama menempuh pendidikan tinggi, penulis juga berpengalaman di bidang organisasi, di antaranya pernah menjabat sebagai Divisi Humas HMM (Himpunan Mahasiswa Mesin) 2023-2024. Penulis pernah terlibat dalam kegiatan Pameran Alat Magic Duduk Tanpa Kursi dan Pelatihan Sepeda Motor Hybrid di Universitas Merdeka Malang. Penulis terlibat dalam kegiatan Pemberdayaan Kemitraan Masyarakat Hibah DPPM 2025 Diktisaintek yang sedang berjalan, dengan judul "Implementasi Mesin Pakan Alternatif Ramah Lingkungan Dukung Ketahanan Pembudidaya Ikan Lele".



Kholida Eldayanti. Lahir di Malang, pada tanggal 08 April 2003. Lulusan SMKN 10 Malang dengan jurusan Teknik Komputer dan Jaringan. Saat ini sedang menempuh pendidikan sarjana pada Prodi S1 Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Merdeka Malang. Selama menempuh pendidikan tinggi, penulis juga berpengalaman di bidang organisasi, diantaranya pernah menjabat sebagai Divisi Humas BEM (Badan Eksekutif Mahasiswa Fakultas Teknik) 2023-2024 serta menjabat sebagai Bendahara HMTE (Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro) 2025–2026. Penulis pernah terlibat dalam kegiatan pengabdian masyarakat Teknik Elektro Unmer Malang di RW 08 Kelurahaan Pisang Candi, Kota Malang, pada 21 Juli 2024 dengan judul "Mengoptimalisasi Usaha Keripik Daun Sirih Rumah Tangga melalui Kontrol Kecepatan Putar pada Mesin Peniris Minyak". Pengalamannya semakin berkembang melalui keikutsertaan pada Program MSIB Batch 7 di BPPSDMP Kementerian Pertanian, yang memperkaya wawasan serta keterampilan dalam bidang akademik maupun organisasi. Penulis terlibat dalam kegiatan Pemberdayaan Kemitraan Masyarakat Hibah DPPM 2025 Diktisaintek yang sedang berjalan, dengan judul "Implementasi Mesin Pakan Alternatif Ramah Lingkungan Dukung Ketahanan Pembudidaya Ikan Lele".



Silvia Wahyuningtyas. Lahir di Batu, pada tanggal 04 November 2003. Telah menempuh pendidikan sekolah dasar di SDN Tulungrejo 03 Batu, pendidikan jenjang sekolah menengah pertama di SMP Negeri 05 Batu, pendidikan jenjang sekolah menengah atas di SMA Islam Hasyim Asy'ari Batu. Saat ini sedang menempuh pendidikan sarjana pada Prodi S1 Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Merdeka Malang. Penulis terlibat dalam kegiatan Pemberdayaan Kemitraan Masyarakat Hibah DPPM 2025 Diktisaintek yang sedang berjalan, dengan judul "Implementasi Mesin Pakan Alternatif Ramah Lingkungan Dukung Ketahanan Pembudidaya Ikan Lele".

Sistem Mekatronika : Implementasi Mesin Pakan Dukung Ketahanan Pangan

ORIGINALITY REPORT

8%	%	%	8%
SIMILARITY INDEX	INTERNET SOURCES	PUBLICATIONS	STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1	Submitted to Sriwijaya University Student Paper	2%
2	Submitted to Universitas Tidar Student Paper	1%
3	Submitted to Universitas Sultan Ageng Tirtayasa Student Paper	1%
4	Submitted to Universitas Muhammadiyah Sidoarjo Student Paper	1%
5	Submitted to Politeknik Negeri Bandung Student Paper	<1%
6	Submitted to Universitas Brawijaya Student Paper	<1%
7	Submitted to Syiah Kuala University Student Paper	<1%
8	Submitted to Universitas Mercu Buana Student Paper	<1%
9	Submitted to Academic Library Consortium Student Paper	<1%
10	Submitted to Universitas Pamulang Student Paper	<1%
11	Submitted to Universitas Muria Kudus Student Paper	<1%
12	Submitted to LL Dikti IX Turnitin Consortium	

	Student Paper	<1%
13	Submitted to Universitas Pendidikan Indonesia Student Paper	<1%
14	Submitted to College of the Canyons Student Paper	<1%
15	Submitted to Institut Teknologi Sumatera Student Paper	<1%
16	Submitted to pnl Student Paper	<1%
17	Submitted to Udayana University Student Paper	<1%
18	Submitted to Universitas Airlangga Student Paper	<1%
19	Submitted to Departement of Electrical Engineering Student Paper	<1%
20	Submitted to Fakultas Teknologi Kebumian dan Energi Universitas Trisakti Student Paper	<1%
21	Submitted to Sultan Agung Islamic University Student Paper	<1%
22	Submitted to Universitas Merdeka Malang Student Paper	<1%
23	Submitted to Fakultas Teknik Student Paper	<1%
24	Submitted to PT Penerbit Erlangga Student Paper	<1%
25	Submitted to Sophia University Student Paper	<1%
	Submitted to Telkom University	

26	Student Paper	<1%
27	Submitted to Universitas PGRI Madiun Student Paper	<1%
28	Submitted to Universitas Esa Unggul Student Paper	<1%
29	Submitted to Osaka University Student Paper	<1%

Exclude quotes	On	Exclude matches	< 1 words
Exclude bibliography	On		