

KECERDASAN BUATAN DALAM SISTEM TENAGA LISTRIK

**S. Nurmuslimah
Dwi Feriyanto
Rismen Sinambela
Riyani Prima Dewi
Dwi Sasmita Aji Pambudi
Leonard Lisapaly
Zainal Abidin**



GET PRESS INDONESIA

KECERDASAN BUATAN DALAM SISTEM TENAGA LISTRIK

Penulis :

S. Nurmuslimah
Dwi Feriyanto
Rismen Sinambela
Riyani Prima Dewi
Dwi Sasmita Aji Pambudi
Leonard Lisapaly
Zainal Abidin

ISBN :

Editor : Ari Yanto, M.Pd

Penyunting : Tri Putri Wahyuni., S.Pd

Desain Sampul dan Tata Letak : Atyka Trianisa, S.Pd

Penerbit : GET PRESS INDONESIA

Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Redaksi :

Jln. Palarik Air Pacah No 26 Kel. Air Pacah
Kec. Koto Tangah Kota Padang Sumatera Barat
Website : www.getpress.co.id
Email : adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, Juni 2024

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan
dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan syukur atas kehadiran Allah SWT dalam segala kesempatan. Sholawat beriring salam dan doa kita sampaikan kepada Nabi Muhammad SAW. Alhamdulillah atas Rahmat dan Karunia-Nya penulis telah menyelesaikan Buku Kecerdasan Buatan Dalam Sistem Tenaga Listrik ini.

Buku Ini Membahas Pengantar Kecerdasan Buatan (AI) dalam Sistem Tenaga Listrik, AI dalam Pengelolaan Beban Listrik, Peningkatan Efisiensi dan Pengurangan Emisi, Optimalisasi Jaringan Distribusi, Teknologi Peralatan Listrik Cerdas, Integrasi Kecerdasan Buatan dan Internet of Things (IoT) dalam Sistem Tenaga Listrik, Kendali Optimal untuk Penyimpanan Energi.

Proses penulisan buku ini berhasil diselesaikan atas kerjasama tim penulis. Demi kualitas yang lebih baik dan kepuasan para pembaca, saran dan masukan yang membangun dari pembaca sangat kami harapkan.

Penulis ucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung dalam penyelesaian buku ini. Terutama pihak yang telah membantu terbitnya buku ini dan telah mempercayakan mendorong, dan menginisiasi terbitnya buku ini. Semoga buku ini dapat bermanfaat bagi masyarakat Indonesia.

Padang, Juni 2024

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR TABEL	viii
BAB 1 KECERDASAN BUATAN DALAM	
TEKNIK TENAGA LISTRIK.....	1
1.1 Pendahuluan.....	1
1.2 Peningkatan Efisiensi	2
1.3 Peningkatan Keandalan	3
1.4 Peningkatan Keberlanjutan	4
1.5 Potensi Kecerdasan Buatan dalam Sistem Tenaga Listrik.....	5
1.6 Tantangan Penerapannya Dalam Kecerdasan Buatan	6
1.7 Internet of Things	8
1.8 Perbedaan Antara IoT Dengan AI.....	9
1.8.1 Kelebihan dan Kekurangan dari IoT	11
1.8.2 Kelebihan dan Kekurangan dari AI	12
1.9 Peralatan Cerdas	12
1.9.1 Tempat Sampah Cerdas	13
1.9.2 Penyedot Debu Cerdas	14
1.9.3 Smart Meter	14
1.9.4 Smart Sensor	16
DAFTAR PUSTAKA	19
BAB 2 KECERDASAN BUATAN DALAM	
PENGELOLAAN BEBAN LISTRIK	21
2.1 Pendahuluan.....	21
2.2 Prediksi Beban	21
2.2.1 Analisis Regresi.....	22
2.2.2 Metode Time Series	24
2.2.3 Jaringan Saraf Tiruan (<i>Artificial Neural Networks</i>)	27
2.2.4 Metode Ensemble	31
2.2.5 Metode <i>Hybrid</i>	34
2.3 Optimasi Sistem	38
2.4 Deteksi Anomali dan Keamanan.....	39

2.5 Manajemen Energi Listrik.....	40
DAFTAR PUSTAKA.....	43
BAB 3 PENINGKATAN EFISIENSI DAN	
PENGURANGAN EMISI.....	45
3.1 Pendahuluan	45
3.2 Pengertian Efisiensi Listrik.....	47
3.3 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Efisiensi Listrik....	49
3.3.1 Jenis peralatan listrik	49
3.3.2 Kondisi penggunaan listrik.....	49
3.3.3 Kebiasaan penggunaan listrik.....	50
3.3.4 Teknologi dan Metode Peningkatan Efisiensi Listrik	52
3.4 Prinsip efisiensi energi.....	66
3.5 Efisiensi energi.....	69
3.6 Siapa yang harus peduli dengan efisiensi energi?	72
3.7 Manfaat Peningkatan Efisiensi Energi.....	75
3.8 Manfaat efisiensi energi bagi dunia usaha.....	77
3.9 Efisiensi Energi Sesuai Dengan Bauran Energi Secara Keseluruhan	78
3.10 Kerugian kehilangan energi	80
3.11 Aliran energi dalam perekonomian nasional.....	81
3.12 Efisiensi konversi energi	83
3.13 Bauran dan Efisiensi Energi Untuk Keberlanjutan Dan Pengembangan Energi.....	84
DAFTAR PUSTAKA.....	87
BAB 4 OPTIMALISASI JARINGAN DISTRIBUSI.....	89
4.1 Jaringan Distribusi Listrik	89
4.2 Optimalisasi Sistem Distribusi.....	91
4.2.1 Jaringan Distribusi Aktif.....	94
4.2.2 Integrasi Smart Grid dengan Manajemen Sistem Distribusi.....	96
4.3 Smart Microgrid	97
DAFTAR PUSTAKA.....	101
BAB 5 TEKNOLOGI PERALATAN LISTRIK CERDAS.....	103
5.1 Pendahuluan	103
5.2 Peran Teknologi Kecerdasan Buatan dalam Peralatan Listrik Cerdas	105
5.3 Komponen Penyusun Peralatan Listrik Cerdas.....	107

5.4 Prinsip Kerja Peralatan Listrik Cerdas	116
5.5 Aplikasi <i>Smart Meter</i>	117
5.6 Aplikasi Smart Lighting	130
DAFTAR PUSTAKA	133
BAB 6 INTEGRASI KECERDASAN BUATAN DAN	
INTERNET OF THINGS (IOT) DALAM SISTEM	
TENAGA LISTRIK	137
6.1 Pendahuluan.....	137
6.2 Kecerdasan Buatan dalam Sistem Tenaga Listrik.....	139
6.2.1 Mengapa Kecerdasan Buatan Digunakan	
Dalam Ketenagalistrikan	139
6.2.2 Kecerdasan Buatan dalam Sistem Tenaga	140
6.3 Internet of Things (IoT) dalam Sistem Tenaga Listrik	143
6.3.1 Teknologi Informatika dan Komunikasi.....	143
6.3.2 Internet of Things (IoT)	144
6.3.3 Model Mini Kecerdasan Buatan dan IoT	146
DAFTAR PUSTAKA	149
BAB 7 KENDALI OPTIMAL TEKNOLOGI	
PENYIMPANAN ENERGI.....	151
7.1 Pendahuluan.....	151
7.2 Teknologi Penyimpanan Energi.....	151
7.3 Peranan Kecerdasan Buatan dalam Produksi	
dan Penyimpanan Energi.....	153
7.4 Bagaimana AI bekerja	154
7.5 Aplikasi Artificial Intelegence dalam Penyimpanan	
Energi.....	157
7.6 Peran Kecerdasan Buatan dalam Sektor Energi.....	157
7.7 Strategi Kontrol Energi.....	164
DAFTAR PUSTAKA	170
BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Peningkatan Efisiensi.....	3
Gambar 1.2. Peningkatan Keandalan	4
Gambar 1.3. Peningkatan Keberlanjutan.....	5
Gambar 1.4. Potensi Kecerdasan Buatan dalam Sistem Tenaga Listrik.....	6
Gambar 1.5. Tantangan Penerapan Kecerdasan Buatan.....	7
Gambar 1.6. <i>Internet of Things</i> (IoT)	8
Gambar 1.7. Perbedaan IoT dan AI	10
Gambar 1.8. Tempat Sampah Cerdas	13
Gambar 1.9. Penyedot Debu Cerdas	14
Gambar 1.10. Smart kWh Meter dan kWh Meter Konvensional	15
Gambar 1.11. Sistem-Sistem Smart Sensor	17
Gambar 3.1. Langkah menghemat energy	53
Gambar 3.2. Sumber energi terbarukan yang umum ...	58
Gambar 3.3. Grafik Efficient World Scenario (EWS).....	66
Gambar 3.4. Elemen Konsumsi Energi Listrik.....	67
Gambar 3.5. Hierarki Energi.....	69
Gambar 3.6. Manfaat peningkatan efisiensi energi	75
Gambar 3.7. Rantai pasokan permintaan energi	79
Gambar 3.8. Ketersediaan Energi.....	82
Gambar 3.9. Konversi sistem energi.....	83
Gambar 4.1. Otomatisasi Pengatur Tegangan Menengah (MV).....	91
Gambar 4.2. Tugas-tugas dalam monitoring sistem Distribusi	91
Gambar 4.3. Tugas-tugas AMI	92
Gambar 4.4. Ilustrasi tentang cara mengontrol aliran volt/var yang terkait dengan saluran distribusi primer menggunakan peralatan pengatur volt/var yang berdiri sendiri dan independen berdasarkan pendekatan VVC tradisional	93
Gambar 4.5. Aplikasi Solar Pnasei di Bruchweg stadium- FSV Mainz 05, Jerman.....	95

Gambar 4.6. Integrasi Manajemen Sistem Distribusi dengan <i>Smart Grid</i>	96
Gambar 4.7. Skema DC dan AC dari Sistem DG <i>microgrid</i>	98
Gambar 4.8. Skema AC dari Sistem DG <i>microgrid</i>	99
Gambar 5.1. Contoh Pengaplikasian Peralatan Listrik Cerdas (<i>Intelligent Electronic Device / IED</i>) pada <i>Smart Grid</i> dalam Sistem Tenaga Listrik	105
Gambar 5.2. <i>Monitoring</i> Internal dan Eksternal pada Peralatan Listrik Cerdas.....	109
Gambar 5.3. <i>Event Reporting</i> dan <i>Fault Diagnosis</i> pada Peralatan Listrik Cerdas.....	110
Gambar 5.4. Fungsi Pengukuran dan Proteksi pada Peralatan Listrik Cerdas.....	111
Gambar 5.5. Tampilan LCD dari <i>Relay</i> Proteksi ABB REF 542plus HMI	112
Gambar 5.6. Peralatan Listrik Cerdas <i>Protection Device</i> SIPROTEC 7SY8 pada LPIT (<i>Low Power</i> <i>Instrument Transformers</i>)	113
Gambar 5.7. Hubungan Antarmuka Jalur Kontrol dan Komunikasi Data pada Peralatan Listrik Cerdas	114
Gambar 5.8. Blok Diagram <i>Intelligent Electronic</i> <i>Device (IED)</i>	114
Gambar 5.9. Fitur-fitur pada <i>Smart Meter</i>	122
Gambar 5.10. Ilustrasi Aliran Daya dan Informasi Data	124
Gambar 5.11. <i>Smart Meter</i> dalam Jaringan Tegangan Rendah (JTR)	128
Gambar 5.12. Deteksi Kecurangan Penggunaan Listrik berdasarkan Analisis Data <i>Energy Balance</i>	130
Gambar 5.13. Aplikasi <i>Smart Lighting</i> pada Lampu Penerangan Jalan	131
Gambar 5.14. Aplikasi <i>Smart Lighting</i> berbasis Teknologi LoRa	132

Gambar 6.1. Trend jumlah penelitian kecerdasan Buatan umum (a) dan jumlah penelitian di sektor tenaga.	142
Gambar 6.2. Teknologi smart grid dan IoT	146
Gambar 6.3. Sistem cerdas mini untuk menyalakan alat pemanas jika suhu ruangan di bawah 33°C (kiri), dan menyalakan alat pendingin ruangan jika suhu ruangan di atas 33°C (kanan). Tombol “Switch on/off” dapat digunakan untuk menyalakan atau mematikan perangkat secara manual.....	147
Gambar 7.1. Aplikasi AI dalam Teknologi Penyimpanan Energi.....	156
Gambar 7.2. Standar Sistem Penyimpanan Energi Baterai (BESS) dan optimisasi dengan AI.....	156
Gambar 7.3. Aplikasi Teknologi AI pada Integrasi Energi Baru Terbarukan dan Sistem Penyimpanan Energi	158

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Sektor efisiensi energi	70
Tabel 6.1. Potensi Penggunaan Kecerdasan Buatan dalam Sistem Tenaga.....	140
Tabel 7.1. Perkembangan riset AI pada optimasi Penyimpanan Energi	160
Tabel 7.2. Beberapa data riset terakhir tentang AI pada sistem kontrol penyimpanan energi	166

BAB 1

KECERDASAN BUATAN DALAM TEKNIK TENAGA LISTRIK

Oleh S. Nurmuslimah

1.1 Pendahuluan

Sistem tenaga listrik merupakan salah satu infrastruktur terpenting dalam kehidupan yang modern. Sistem ini menyediakan energi listrik yang diperlukan dalam berbagai kegiatan, mulai dari penerangan, transportasi, hingga dunia industri. Namun, sistem tenaga listrik juga menghadapi berbagai tantangan, seperti meningkatnya permintaan energi, volatilitas harga energi, dan perubahan iklim.

Sebagai sistem penyediaan energi utama dan sistem buatan yang paling rumit, sistem tenaga listrik sedang mengalami perubahan revolusioner, termasuk sumber daya energi terbarukan dengan penetrasi tinggi, jaringan rumit, dengan komunikasi data yang luar biasa, dan berbagai perangkat listrik dengan fitur aliran energi dua arah.

Tenaga listrik merupakan bentuk energi sekunder yang dapat dibangkitkan, ditransmisikan dan didistribusikan kepada pelanggan/konsumen yang dapat dimanfaatkan dalam segala macam keperluan. Sistem tenaga listrik merupakan rangkaian instalasi tenaga listrik yang terdiri dari sistem pembangkitan, sistem transmisi dan sistem distribusi yang saling terintegrasi dan berfungsi untuk memenuhi kebutuhan energi listrik bagi semua orang.

Dalam sistem pembangkit tenaga listrik yang merupakan rangkaian instalasi terdiri dari peralatan-peralatan seperti generator yang digunakan untuk menghasilkan energi listrik. Pembangkit listrik bekerja dengan mengubah energi potensial menjadi energi mekanik kemudian digunakan untuk menghasilkan energi listrik. Energi potensial menggerakkan turbin kemudian putaran turbin yang merupakan energi

mekanik digunakan untuk memutar generator listrik. Kemudian generator listrik dapat mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik.

Kecerdasan Buatan (*Artificial Intelligence* atau AI) telah mengalami kemajuan yang sangat pesat dalam beberapa tahun terakhir ini, dan dampaknya terasa di berbagai sektor, termasuk dalam sektor industri energi. Dalam konteks sistem tenaga listrik, penerapan AI dapat mengubah dan dapat menghasilkan, mendistribusikan, dan mengelola energi. Melalui analisis data yang canggih, otomatisasi proses, dan pengambilan keputusan cerdas. AI bisa mengoptimalkan kinerja pembangkit listrik terbarukan, memantau serta mengontrol operasi secara smart, sehingga dapat meningkatkan efisiensi, keandalan, dan produktivitas energi terbarukan serta mengefisienkan biaya produksi yang keberlanjutan dalam sistem tenaga listrik.

1.2 Peningkatan Efisiensi

Salah satu area penerapan AI (*Artificial Intelligence*) yang paling potensial adalah peningkatan efisiensi sistem tenaga listrik. AI dapat digunakan untuk :

1. Memprediksi beban listrik.

AI dapat digunakan untuk memprediksi beban listrik dengan lebih akurat dari pada metode-metode tradisional. Prediksi beban yang akurat dapat membantu operator sistem tenaga untuk mengatur pembangkit dan jaringan dengan lebih efisien.

2. Optimalisasi operasi pembangkit.

AI dapat digunakan untuk mengoptimalkan operasi pembangkit listrik, baik pembangkit konvensional maupun pembangkit terbarukan. Contohnya, AI dapat digunakan untuk mengatur jadwal operasi pembangkit, mengoptimalkan pengaturan beban, dan memaksimalkan pemanfaatan energi terbarukan.

3. Pengendalian jaringan.

AI dapat digunakan untuk meningkatkan pengendalian jaringan tenaga listrik, termasuk pengendalian aliran

daya, pengendalian frekuensi, dan pengendalian stabilitas sistem.



Gambar 1.1. Peningkatan Efisiensi
(Sumber: <https://www.shutterstock.com>)

1.3 Peningkatan Keandalan

Akurasi dan keandalan adalah dua aspek penting dalam mengukur kualitas sistem AI. Akurasi mengacu pada seberapa baik sistem dapat menghasilkan keluaran yang benar atau diharapkan untuk serangkaian masukan tertentu seperti gambar, teks, suara, atau data. Keandalan mengacu pada seberapa konsisten dan stabil kinerja sistem dari waktu ke waktu dalam berbagai situasi, seperti perubahan data, lingkungan, atau perilaku pengguna.

AI juga dapat digunakan dalam peningkatan keandalan seperti :

1. Deteksi gangguan.

AI dapat digunakan untuk mendeteksi kejadian lebih cepat dan akurat daripada metode tradisional. Deteksi gangguan yang cepat dan akurat dapat membantu mencegah terjadinya pemadaman listrik.

2. Pemulihan dari gangguan.

AI dapat digunakan untuk merancang strategi pemulihan dari gangguan yang lebih efektif. Strategi pemulihan yang efektif dapat membantu mempercepat pemulihan sistem tenaga listrik setelah terjadi gangguan.

3. Pemeliharaan preventif.

AI dapat digunakan untuk mengembangkan rencana pemeliharaan preventif yang lebih akurat. Rencana pemeliharaan preventif yang akurat dapat membantu mencegah terjadinya kerusakan peralatan yang dapat menyebabkan pemadaman listrik.



Gambar 1.2. Peningkatan Keandalan
(Sumber: <https://web.pln.co.id/>)

1.4 Peningkatan Keberlanjutan

Penggunaan teknologi kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence/AI*) semakin dikenal. Teknologi ini tidak hanya membantu pekerjaan manusia menjadi lebih efisien, yang berdampak positif bagi pembangunan keberlanjutan.

AI juga dapat digunakan untuk peningkatan keberlanjutan seperti :

1. Pengelolaan energi terbarukan.

AI dapat digunakan untuk mengelola energi terbarukan, seperti energi surya dan angin, secara lebih efisien dan efektif. Contohnya, AI dapat digunakan untuk mengoptimalkan penggunaan energi surya dan angin untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil.

2. Pengurangan emisi.

AI dapat digunakan untuk mengembangkan teknologi baru untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dari sistem tenaga listrik. Contohnya, AI dapat digunakan untuk mengembangkan teknologi penyimpanan energi yang lebih efisien dan efektif.

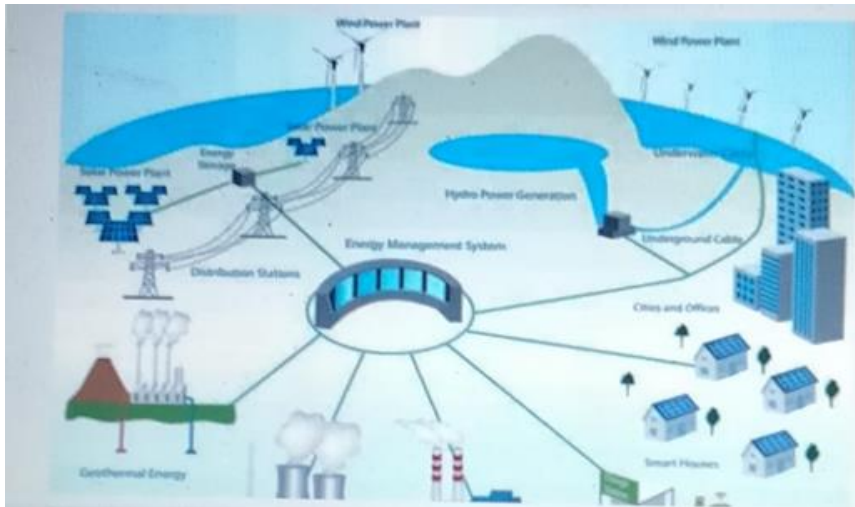


Gambar 1.3. Peningkatan Keberlanjutan
(Sumber: <https://web.pln.co.id/>)

1.5 Potensi Kecerdasan Buatan dalam Sistem Tenaga Listrik

Potensi kecerdasan buatan dalam sistem tenaga listrik sangatlah besar. AI dapat membantu mengatasi berbagai tantangan yang dihadapi sistem tenaga listrik, seperti

meningkatnya permintaan energi, volatilitas harga energi, dan perubahan iklim.



Gambar 1.4. Potensi Kecerdasan Buatan dalam Sistem Tenaga Listrik
(Sumber: <https://www.minergy-news.com>)

Dengan penerapan AI yang tepat, sistem tenaga listrik dapat menjadi lebih efisien, andal, dan berkelanjutan.

1.6 Tantangan Penerapannya Dalam Kecerdasan Buatan

Meskipun memiliki potensi yang besar, penerapan kecerdasan buatan dalam sistem tenaga listrik dapat menghadapi berbagai tantangan. Salah satu tantangan terbesar adalah kurangnya data yang memadai untuk melatih model AI. Selain itu, penerapan AI memerlukan biaya yang tidak sedikit.

Untuk mengatasi tantangan-tantangan tersebut, maka diperlukan kerja sama yang erat antara berbagai pihak, seperti pemerintah, industri, dan akademisi. Kerja sama yang erat ini diperlukan untuk mengembangkan teknologi AI yang tepat dalam sistem tenaga listrik dan untuk membangun infrastruktur yang mendukung penerapan AI.



Gambar 1.5. Tantangan Penerapan Kecerdasan Buatan
(Sumber: <https://mki-ieps.id/8>)

Kecerdasan buatan atau yang lebih dikenal dengan *Artificial Intelligence* (AI), adalah simulasi dari kecerdasan dimiliki oleh manusia yang dimodelkan dalam mesin dan diprogram agar bisa berpikir seperti halnya manusia atau dengan kata lain AI merupakan sistem komputer yang bisa melakukan pekerjaan-pekerjaan pada umumnya memerlukan kecerdasan manusia dalam menyelesaikan pekerjaan. AI merupakan teknologi yang memerlukan data untuk dijadikan pengetahuan, sama seperti manusia. AI membutuhkan pengalaman dan data supaya kecerdasannya bisa lebih baik lagi. AI secara umum dapat mengacu pada kemampuan manusia dalam pemecahan masalah dan pengenalan pola. Prinsip dasar pada AI adalah komputer yang dapat diprogram untuk melaksanakan tugas yang biasanya memerlukan kecerdasan manusia. Seiring dengan perkembangan dan kemajuan teknologi bidang komputer dan pemrograman, kemampuan AI semakin berkembang serta semakin banyak digunakan dalam berbagai bidang.

Hal yang menarik dari AI adalah mampu melakukan *self correction* atau mengoreksi diri sendiri. Penerapan AI banyak mempengaruhi cara hidup, berinteraksi dan meningkatkan

pengalaman dan kenyamanan. AI berkembang terus di tahun-tahun mendatang lebih baik dan lebih banyak perbaikan, pengembangan dan penerapannya lebih luas.

1.7 Internet of Things

IoT adalah sistem perangkat yang terhubung, mesin mekanis dan digital, atau objek dengan pengidentifikasi unik dengan kemampuan untuk mentransfer data melalui jaringan tanpa memerlukan interaksi manusia ke manusia atau manusia ke komputer. Sesuatu dalam IoT dapat berupa implant monitor jantung seseorang, mobil dengan sensor bawaan untuk mengingatkan pengemudi ketika tekanan ban rendah atau objek lain apapun yang dapat diberi alamat IP dan mentransfer data melalui jaringan.



Gambar 1.6. *Internet of Things (IoT)*
(Sumber : Simplilearn)

IoT merupakan konsep baru dalam komunikasi yang mendukung manusia untuk dapat saling berkomunikasi dan melakukan berbagai hal secara otomatis. Konsep IoT muncul beberapa tahun yang lalu dan pada saat itu telah berkembang menjadi salah satu pilar penting teknologi yang baru. Kemudian

menambahkan kecerdasan buatan atau *Artificial Intelligence* (AI) ke sistem IoT.

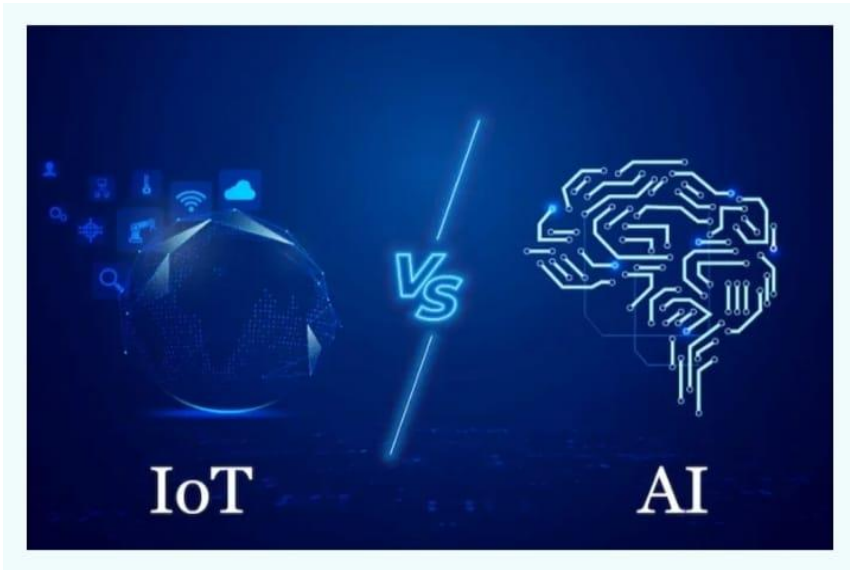
Kecerdasan buatan semakin banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari. Penerapan AI dan IoT dilakukan di banyak sektor, seperti pada bidang industri, kesehatan, rumah pintar, dan kendaraan otonom. IoT dan kecerdasan buatan menyatu menjadi produk baru yang ke depannya sangat mempengaruhi teknologi dunia di masa depan untuk menjadikan teknologi serba otomatis.

Secara khusus, kombinasi kecerdasan buatan dengan komputasi awan, data besar, internet of things (IoT), dan interkoneksi seluler dapat memberikan sistem tenaga fitur interaksi cerdas, keamanan dan pengendalian. Dengan demikian, keamanan, keandalan, dan fleksibilitas jaringan listrik dapat ditingkatkan secara signifikan juga revolusi sistem tenaga dan energi dapat dipercepat. (Purba, 2020)

Kecerdasan buatan untuk segala (AloT) adalah kombinasi teknologi kecerdasan buatan (AI) dan infrastruktur internet untuk segala (IoT). Tujuan AloT adalah menciptakan operasi IoT yang lebih efisien, meningkatkan interaksi manusia dengan mesin, serta meningkatkan manajemen dan analisis data.

1.8 Perbedaan Antara IoT Dengan AI

IoT banyak digunakan dalam berbagai aplikasi termasuk rumah pintar, kota pintar, industri, pertanian, kesehatan, pelacak kebugaran, digitalisasi pabrik, smart devices, smart parking, dan pemantauan air. Sedangkan AI banyak digunakan dalam berbagai aplikasi termasuk pembelajaran mesin, penalaran, pengolahan bahasa alami, pemrosesan, robotika, pengenalan pola, pengenalan suara, visi mesin dan sistem rekomendasi.



Gambar 1.7. Perbedaan IoT dan AI
(Sumber : Afkham)

AI (*Artificial Intelligence*) sangat berhubungan dengan dunia robot. Dalam prinsip kerjanya, IoT menjadi tempat untuk mengumpulkan informasi dan berperan sebagai mesin yang menganalisa dan memutuskan sesuatu yang berhubungan dengan informasi. IoT tidak dapat berjalan dengan baik apabila tidak diiringi dengan AI, karena AI dapat menyelesaikan masalah dengan baik.

Adapun perbedaan antara AI dan IoT berdasarkan proses dan kebutuhan adalah :

1. Komputasi Awan

Artificial Intelligence (AI) adalah perangkat lunak yang sangat kuat yang dapat berpikir, melakukan dan belajar dari kejadian manusia. Kecerdasan buatan (AI) dan *Internet Of Things* (IoT) keduanya saling melengkapi dalam hal kinerja, tetapi IoT *cloud* memberikan jalur untuk menangani data.

2. Pengadaan data

Kecerdasan Buatan/*Artificial Intelligence* (AI) memahami, mempelajari, meningkatkan kinerja dari kesalahan. Selain

itu sangat membantu dalam pengambilan keputusan yang efisien di mana IoT menangkap konsekuensi pada sensor yang mengumpulkan dan menyimpan data pada saat kapanpun diperlukan.

3. Data

Kecerdasan Buatan memiliki kemampuan untuk memahami pola dan perilaku di mana *Internet Of Things* (IoT) adalah yang berhubungan dengan sensor.

4. Algoritma

Artificial Intelligence (AI) sepenuhnya didasarkan pada algoritma pembelajaran, yang dikumpulkan dan menghasilkan sesuatu dalam sistem. *Internet Of Things* (IoT) digunakan untuk membangun algoritma dalam mengekspresikan perilaku sistem.

5. Perilaku

Artificial Intelligence (AI) adalah reaksi spontan dalam menerima masukan. Pada saat yang sama, IoT menyimpan respons yang telah ditentukan sebelum menggunakan perangkat dan ditentukan sebelumnya dengan menerapkan kode tertentu berdasarkan berbagai algoritma.

Adapun kelebihan dan kekurangan dari Kecerdasan Buatan (AI) dan *Internet of Things* (IoT) adalah sebagai berikut :

1.8.1 Kelebihan dan Kekurangan dari IoT

Adapun kelebihan-kelebihan IoT adalah :

1. Sangat fleksibel
2. Memungkinkan untuk tetap terhubung
3. Konsumsi energi yang efisien
4. Aplikasi portable
5. Sangat bermanfaat di bidang kesehatan
6. Penghematan biaya

Adapun kekurangan-kekurangan dari IoT adalah :

7. Sangat bergantung pada mesin dan teknologi, sehingga lebih sedikit otak manusia yang dibutuhkan.
8. Meningkatkan kelesuan di antara pekerja karena memegang pekerjaan dengan satu klik.
9. Meningkatkan pengangguran.

1.8.2 Kelebihan dan Kekurangan dari AI

Adapun kelebihan-kelebihan AI adalah :

1. Membantu dalam menyelesaikan masalah yang rumit
2. Memberikan hasil yang akurat
3. Berguna untuk menyelesaikan tugas yang berulang.
4. Mengkoordinasikan manusia dan mesin yang bekerja bersama
5. Mencatat data dalam urutan yang sistematis

Adapun kekurangan-kekurangan dari AI adalah :

6. AI itu mahal
7. Penyimpanan AI mahal
8. Manusia lebih kreatif daripada AI
9. Ketergantungan yang tinggi pada mesin

1.9 Peralatan Cerdas

Peralatan cerdas adalah peralatan yang dilengkapi dengan objek pintar yang mampu merasakan, menggerakkan, dan berkomunikasi. Peralatan cerdas berada di garis depan dalam menampilkan utilitas IoT di lingkungan rumah pintar. Setiap peralatan rumah tangga diharapkan akan menjadi perangkat IoT di masa depan, sehingga membuka jalan untuk menciptakan aplikasi baru guna memberikan tingkat kontrol dan kenyamanan yang lebih besar bagi semua orang di rumah. Sehingga memungkinkan penghuni rumah pintar dapat memantau dan mengontrol peralatan rumah tangga dari jarak jauh. Peralatan cerdas dapat membangun komunikasi M2M (*Machine-to-Machine*) antara berbagai peralatan pintar di dalam rumah untuk memulai perilaku otonom guna memfasilitasi pekerjaan sehari-hari. Maka dengan ini memerlukan jaringan tangguh yang dapat mendukung perangkat heterogen dan memfasilitasi eksekusi kode otonom.

Peralatan apapun bisa menjadi pintar apabila konektivitas dengan nirkabel dan sensor yang memungkinkan lewat kendali jarak jauh atau pengoperasian otonom melalui input pengguna, penjadwalan, kecerdasan buatan dan pembelajaran mesin (AI/ML). Sensor yang dikombinasikan dengan konektivitas nirkabel dapat memberikan informasi kepada pengguna akhir tentang penggunaan peralatan, suhu, masa pakai, jadwal pemeliharaan, atau anomaly

pengoperasian. Peralatan cerdas memungkinkan pengguna untuk menghubungkan, mengontrol, dan memantau peralatan sehingga dapat menghemat waktu, energi dan uang. Misalnya dapat menjadwalkan atau mengatur waktu pengoperasian agar sesuai jadwal yang diinginkan, memanfaatkan energi yang lebih murah di luar jam sibuk, atau memaksimalkan pemanfaatan tenaga surya untuk menghemat waktu, uang dan lingkungan. Peralatan pintar juga dapat memantau peralatan dari jarak jauh untuk memastikan peralatan dimatikan demi keamanan saat meninggalkan rumah. Beberapa contoh peralatan cerdas antara lain yaitu :

1.9.1 Tempat Sampah Cerdas

Dengan teknologi IoT (*Internet of Things*) membuat kehidupan lebih efisien, di antara berbagai sektor yang memperoleh manfaat dari teknologi ini adalah pengelolaan sampah cerdas sebagai elemen yang penting dalam meningkatkan kelayakan huni. Tempat sampah cerdas pada gambar 1.8 memperlihatkan cara kerja sehingga dapat mengurangi kontak tangan saat akan membuang sampah.



Gambar 1.8. Tempat Sampah Cerdas
(Sumber: <https://m.media-amazon.com>, 2022)

1.9.2 Penyedot Debu Cerdas

Dalam urusan membersihkan rumah, banyak perangkat pembersih canggih yang dikerjakan oleh robot, salah satunya robot *vacuum cleaner* atau penyedot debu. Alat ini tampak unik dan menarik, karena secara otomatis dapat berjalan sendiri menyusuri ruangan untuk membersihkan debu. Dengan ukuran yang sangat kecil dan mempunyai kemampuan dalam menjalankan siklus pembersihan dengan menekan satu tombol.



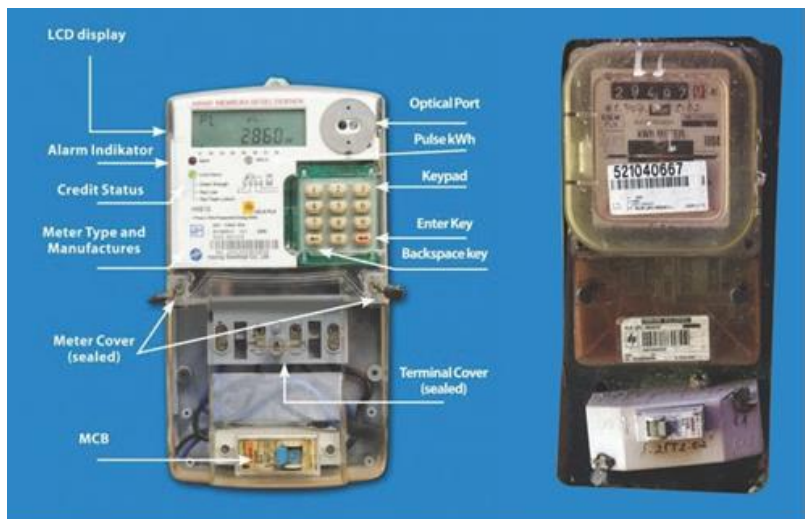
Gambar 1.9. Penyedot Debu Cerdas
(Sumber: Pexels/Kindel Media, 2021)

Pada gambar 1.9 adalah penyedot debu cerdas yang menggunakan tenaga baterai, apabila baterainya habis maka penyedot debu bergerak ke tempat pengisian baterai dan melakukan pengisian baterai sampai penuh.

1.9.3 Smart Meter

Smart meter adalah sebuah system IoT dalam bentuk software dan hardware yang memberikan kemudahan dalam pencatatan pemakaian air, listrik atau gas dengan

memanfaatkan teknologi komunikasi yang beragam. Dan mempermudah pelanggan dalam monitoring konsumsi pemakaian sehingga pelanggan bisa melakukan efisiensi. Smart meter adalah alat yang digunakan untuk mencatat penggunaan listrik. Sehingga smart meter dapat ditemukan di rumah pelanggan, yang digunakan sebagai pengganti meter listrik secara konvensional. Komponen ini termasuk dalam bagian jaringan tenaga listrik atau smart grid.



Gambar 1.10. Smart kWh Meter dan kWh Meter Konvensional
(Sumber: web.pln.co.id, 2017)

Smart meter memiliki banyak manfaat bagi penggunaanya, yaitu : (Daryanto dkk,2016)

1. Tidak memerlukan pencatatan secara manual.
2. Data pengukuran pelanggan lebih valid dan dipantau secara realtime.
3. Tidak adanya tunggakan tagihan pelanggan.
4. Mengurangi biaya operasi aktivasi dan deaktivasi pelanggan dengan teknologi buka tutup secara otomatis.
5. Mendukung bisnis perusahaan untuk pelanggan prabayar dan pascabayar.

6. Mendukung pencatatan pendapatan perusahaan untuk pelanggan pascabayar secara cash based bukan estimasi pemakaian.
7. Mempermudah pelanggan dalam monitoring konsumsi pemakaian sehingga pelanggan bias melakukan efisiensi.

1.9.4 Smart Sensor

Pada era perkembangan teknologi yang pesat, smart sensor menjadi semakin populer. Smart sensor adalah sebuah perangkat yang mampu melakukan pengukuran dan pengamatan lingkungan secara cerdas dengan menggunakan teknologi sensor yang terintegrasi. Teknologi ini membawa dampak positif di berbagai sektor, seperti industri, otomotif, dan rumah pintar. Dengan perannya yang semakin penting smart sensor menjadi unsur yang tak terpisahkan dalam era Internet of Things (IoT) dan transformasi digital.

Smart sensor adalah perangkat elektronik yang dilengkapi dengan kemampuan cerdas untuk mengukur, memonitor, dan merespons berbagai parameter lingkungan. Berbeda dengan sensor konvensional, smart sensor memiliki kemampuan pemrosesan data dan pengambilan keputusan yang lebih tinggi. Dalam banyak kasus, smart sensor terhubung ke sistem komputer atau jaringan untuk mentransfer informasi.(Purba, 2020)

Ada beberapa fungsi dari smart sensor adalah :

1. Pemantauan dan pengukuran secara Real-Time
Salah satu fungsi dari smart sensor adalah memberikan data pengukuran secara real-time, contoh dalam industri, smart sensor dapat digunakan untuk memantau suhu, tekanan, atau kelembaban di lingkungan produksi.
2. Pengambilan keputusan otomatis
Smart sensor memiliki kemampuan untuk melakukan pengolahan data dan pengambilan keputusan secara otomatis. Hal ini memungkinkan sistem untuk merespon perubahan kondisi lingkungan tanpa intervensi manusia.
3. Efisiensi energi
Dalam aplikasi rumah pintar, smart sensor digunakan untuk mengoptimalkan penggunaan energi. Contoh sensor cahaya dapat mendeteksi kehadiran orang di ruangan dan

mengatur pencahayaan secara otomatis untuk menghemat energi.

4. Monitoring kesehatan struktur

Dalam bidang konstruksi atau pemeliharaan infrastruktur, smart sensor digunakan untuk memonitor kesehatan struktur seperti jembatan atau bangunan.

5. Penerapan dalam kehidupan sehari-hari

Smart sensor semakin meresap ke dalam kehidupan sehari-hari. Misalnya dalam perangkat pintar seperti thermometer pintar, sensor suhu cerdas digunakan untuk memberikan data suhu yang akurat dan melaporkannya pada pengguna melalui aplikasi ponsel pintar.

Dengan kemampuan cerdasnya, smart sensor berkontribusi besar dalam meningkatkan efisiensi, keamanan, dan kenyamanan dalam berbagai konteks.



Gambar 1.11. Sistem-Sistem Smart Sensor

Penerapan kecerdasan buatan dalam sistem tenaga listrik memiliki potensi untuk mengubah masa depan energi. Dengan penerapan AI yang tepat, sistem tenaga listrik dapat menjadi lebih efisien, andal, dan berkelanjutan. Hal ini akan

memberikan manfaat bagi masyarakat dan lingkungan. (Ardiyanto, 2021)

Salah satu contoh transformasi digital yang dilakukan PLN adalah dengan kehadiran PLN Mobile, sebagai aplikasi khusus pengguna untuk mengadakan keluhan, menyampaikan pendapat hingga mengetahui tindak lanjut pelaporan isu. Nantinya, teknologi AI akan diadaptasi dan digunakan untuk berinteraksi langsung dengan pelanggan pada PLN Mobile melalui fitur Chatbot. Penggunaan teknologi ini diharapkan bisa membuat komunikasi dengan pelanggan menjadi lebih baik, dengan pemakaian bahasa yang lebih manusiawi dan tidak terkesan komputer.

Dengan proses pembelajaran AI yang masih akan dilakukan oleh PLN, diharapkan nanti teknologi ini juga bisa memprediksi dampak gangguan serta penyelesaian dari masalah yang dialami pelanggan. Selain itu, pengguna juga bisa mendapatkan informasi lain yang berhubungan dengan pelayanan PLN seperti informasi pasang baru listrik hingga pengembangan bisnis di luar kelistrikan seperti internet.

DAFTAR PUSTAKA

- Agus Harya Maulana, 2005, "Buku SCADA Edisi 2", Bops PLN Jawa Bali.
- Ardiyanto, 2021, "Peran Sarjana Teknik di Era Revolusi Industri 4.0".
- Badruddin, 2010, "Sistem Distribusi; Pusat Pengembangan Bahan Ajar - UMB"
- Dale R. Patrick, Stephen W. Fardo, 2009, "Electrical distribution systems --2nd ed.", Fairmont Press.
- Daryanto dkk, 2016, "Teknik Pengerjaan Listrik", Jakarta Bumi Aksara.
- Daman Suswanto, 2009, "Sistem Distribusi Tenaga Listrik", Bahan Ajar UNP.
- Dugan, Roger C, dkk, 2004, "Electrical Power System Quality Second Edition", McGraw- Hill.
- Gonen, Turan, 1986, "Electric Power Distribution System Engineering", McGraw-Hill.
- Hanra, 2010, "Laporan Kerja Praktek: Konfigurasi dan Pengoperasian Human Machine (HMI) PT. PLN (Persero) APD Bandung".
- Hutauruk, T. S. 1999, "Pengetanahan Netral Sistem Tenaga dan Pengetanahan Peralatan", Erlangga: Jakarta.
- Hidayat, Ahmad. 2019. "Produksi listrik PLTB Sidrap ke jaringan listrik PLN melampaui proyeksi." PT PLN (Persero).
- Hidayat, Ahmad. 2020. "Menilik PLTGU Jawa 2 pembangkit yang efisien dan ramah lingkungan." PT PLN (Persero).
- Imam Robandi, 2006, "Desain Sistem Tenaga Modern", Penerbit Andi, Yogyakarta.
- Ismara, K. Ima, dan Eko Prianto, 2016. "Keselamatan dan Kesehatan Kerja di Bidang Kelistrikan (Electrical Safety)". Solo: CV Adicandra Media Grafika.
- Mohamad A El-Hawary, 2016, "Advanced Solutions in Power Systems", Wiley.
- Purba, Mortigor Afizal dan teman-teman, 2020, "Revolusi Industri 4.0".

Rakhman, Alief. 2020. "Sistem tenaga listrik di Indonesia."
Rakhman.net.

Weerakorn Ongsakul and Dien Ngoc Vo, 2013,"Artificial in
Power System Optimization", CRE Press.

BAB 2

KECERDASAN BUATAN DALAM PENGELOLAAN BEBAN LISTRIK

Oleh Dwi Feriyanto

2.1 Pendahuluan

Pengelolaan beban listrik adalah proses merencanakan, mengoperasikan, dan mengoptimalkan penggunaan energi listrik untuk memastikan keandalan dan efisiensi dalam penyediaan listrik. Hal ini mencakup berbagai strategi dan teknologi untuk menyeimbangkan pasokan dan permintaan listrik, mengurangi biaya, dan meminimalkan dampak lingkungan. Pengelolaan beban listrik merupakan salah satu area dimana kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*) yang disingkat (AI) dapat memberikan kontribusi yang signifikan.

Penerapan kecerdasan buatan dalam pengelolaan beban listrik, dapat meningkatkan efisiensi operasional, mengurangi biaya, dan meningkatkan keandalan sistem energi secara keseluruhan. Dengan memanfaatkan kecerdasan buatan, kita dapat mengoptimalkan penggunaan sumber daya energi, mengurangi emisi karbon, dan menciptakan sistem energi yang lebih adaptif dan responsif terhadap kebutuhan masyarakat modern. Kecerdasan buatan dapat digunakan untuk prediksi beban listrik, optimasi sistem kelistrikan, deteksi anomali, dan manajemen energi listrik. Berikut beberapa pokok kecerdasan buatan dalam pengelolaan beban listrik.

2.2 Prediksi Beban

Prediksi beban listrik adalah proses memperkirakan jumlah energi listrik yang akan dikonsumsi oleh konsumen di suatu wilayah atau sistem pada waktu tertentu di masa mendatang. Prediksi ini sangat penting dalam perencanaan dan pengelolaan jaringan listrik untuk memastikan ketersediaan energi yang memadai dan mencegah kelebihan beban atau

kekurangan pasokan yang dapat menyebabkan gangguan atau pemadaman listrik.

Kecerdasan buatan dapat digunakan untuk menganalisis pola konsumsi energi listrik dari data historis dan faktor-faktor seperti cuaca, hari libur, dan peristiwa khusus lainnya. Dengan menggunakan algoritma prediktif, sistem dapat memprediksi beban listrik yang diperlukan dimasa depan dengan tingkat akurasi yang tinggi.

Beberapa metode yang sering digunakan untuk melakukan prediksi beban listrik meliputi:

2.2.1 Analisis Regresi

Metode ini menggunakan data historis beban listrik dan faktor-faktor lainnya seperti cuaca, hari dalam seminggu, musim, dan peristiwa khusus untuk membangun model statistik yang dapat memprediksi beban listrik dimasa depan.

Langkah-langkah prediksi beban listrik:

1. Mengumpulkan Data
 - a. Beban Listrik: Data historis beban listrik harian (kWh).
 - b. Suhu: Data suhu harian (derajat *Celsius*).
 - c. Waktu: Informasi mengenai tanggal dan waktu untuk menangkap pola musiman dan mingguan.
2. Pra-pemrosesan Data
 - a. Mengatasi *missing values* dan *outliers*.
 - b. Normalisasi atau standarisasi data jika diperlukan.
3. Pemodelan Regresi *Linear*
 - a. Menggunakan pustaka seperti *scikit-learn* di Python untuk membangun model regresi *linear*.
 - b. Memisahkan data menjadi set pelatihan dan pengujian.
4. Evaluasi Model

Menggunakan metrik evaluasi seperti *Mean Absolute Error* (MAE) atau *Root Mean Squared Error* (RMSE).

Berikut adalah contoh kode sederhana untuk prediksi beban listrik menggunakan regresi *linear* dengan Python dan *scikit-learn*.

```
import numpy as np
import pandas as pd
from sklearn.model_selection import train_test_split
```

```

from sklearn.linear_model import LinearRegression
from sklearn.metrics import mean_absolute_error,
mean_squared_error

# 1. Mengumpulkan Data
# Misalkan kita punya data dalam file CSV dengan kolom 'Date',
'Temperature', dan 'Load'
data = pd.read_csv('electricity_load.csv')

# 2. Pra-pemrosesan Data
# Konversi kolom 'Date' menjadi datetime
data['Date'] = pd.to_datetime(data['Date'])
# Ekstraksi fitur waktu
data['DayOfWeek'] = data['Date'].dt.dayofweek
data['Month'] = data['Date'].dt.month
data['Day'] = data['Date'].dt.day

# Memilih fitur dan target
features = data[['Temperature', 'DayOfWeek', 'Month', 'Day']]
target = data['Load']

# Membagi data menjadi set pelatihan dan pengujian
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(features, target,
test_size=0.2, random_state=42)

# 3. Pemodelan Regresi Linear
model = LinearRegression()
model.fit(X_train, y_train)

# 4. Evaluasi Model
# Prediksi
y_pred = model.predict(X_test)

# Menghitung metrik evaluasi
mae = mean_absolute_error(y_test, y_pred)
rmse = np.sqrt(mean_squared_error(y_test, y_pred))

print(f'Mean Absolute Error (MAE): {mae}')

```

```
print(f'Root Mean Squared Error (RMSE): {rmse}')
```

```
# Prediksi beban listrik harian untuk data baru
```

```
new_data = pd.DataFrame({  
    'Temperature': [25, 30],  
    'DayOfWeek': [2, 3],  
    'Month': [5, 5],  
    'Day': [15, 16]  
})  
predictions = model.predict(new_data)  
print(predictions)
```

Penjelasan Kode

- a) Mengumpulkan Data: Data beban listrik dan suhu dikumpulkan dalam format CSV.
- b) Pra-pemrosesan Data: Data tanggal dikonversi menjadi komponen-komponen waktu yang relevan (hari dalam minggu, bulan, dan hari).
- c) Pemodelan Regresi *Linear*: Model regresi *linear* dibangun menggunakan pustaka *scikit-learn*. Data dipisahkan menjadi set pelatihan dan pengujian.
- d) Evaluasi Model: Model dievaluasi menggunakan metrik MAE dan RMSE untuk menilai akurasi prediksi.

Prediksi beban listrik menggunakan analisis regresi *linear* merupakan pendekatan yang sederhana namun efektif untuk memodelkan hubungan antara beban listrik dan faktor-faktor penentu seperti suhu dan waktu. Dengan menggunakan metode ini, perusahaan utilitas dapat mengelola permintaan listrik dengan lebih baik dan meningkatkan efisiensi operasional.

2.2.2 Metode Time Series

Metode ini memodelkan tren dan pola musiman dalam data beban listrik menggunakan analisis deret waktu. Dengan memanfaatkan teknik seperti ARIMA (*Auto Regressive Integrated Moving Average*), dapat dilakukan prediksi yang akurat. Berikut

adalah contoh prediksi beban listrik menggunakan model ARIMA dengan Python.

Langkah-langkah prediksi beban listrik dengan ARIMA :

1. Mengumpulkan Data
Beban Listrik: Data historis beban listrik, biasanya dalam interval jam, harian, atau mingguan.
2. Pra-pemrosesan Data
 - a. Mengatasi *missing values* dan *outliers*.
 - b. Melakukan stasioneritas dengan *differencing* jika diperlukan.
3. Pemodelan dengan ARIMA
 - a. Menentukan parameter ARIMA (p, d, q) menggunakan analisis ACF (*Autocorrelation Function*) dan PACF (*Partial Autocorrelation Function*).
 - b. Memisahkan data menjadi set pelatihan dan pengujian.
4. Evaluasi Model
Menggunakan metrik evaluasi seperti *Mean Absolute Error* (MAE) atau *Root Mean Squared Error* (RMSE).
5. Prediksi
Menggunakan model untuk memprediksi beban listrik dimasa depan.

Contoh kode sederhana untuk prediksi beban listrik menggunakan ARIMA dengan Python dan pustaka *statsmodels*.

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from statsmodels.tsa.arima.model import ARIMA
from sklearn.metrics import mean_absolute_error,
mean_squared_error
```

```
# 1. Mengumpulkan Data
```

```
# Misalkan kita punya data dalam file CSV dengan kolom 'Date' dan 'Load'
```

```
data = pd.read_csv('electricity_load.csv', parse_dates=['Date'],
index_col='Date')
```

```
# 2. Pra-pemrosesan Data
```

```

# Mengisi missing values dengan interpolasi
data['Load'].interpolate(method='time', inplace=True)

# Memvisualisasikan data beban listrik
data['Load'].plot(figsize=(10, 6))
plt.title('Electricity Load Over Time')
plt.show()

# 3. Membuat Model ARIMA
# Membagi data menjadi set pelatihan dan pengujian
train_size = int(len(data) * 0.8)
train, test = data.iloc[:train_size], data.iloc[train_size:]

# Menentukan parameter ARIMA dengan menggunakan ACF dan PACF
# Di sini, kita langsung menetapkan parameter (p, d, q) sebagai contoh
p, d, q = 5, 1, 2

# Membuat dan melatih model ARIMA
model = ARIMA(train['Load'], order=(p, d, q))
model_fit = model.fit()

# 4. Evaluasi Model
# Prediksi
predictions = model_fit.forecast(steps=len(test))
# Menghitung metrik evaluasi
mae = mean_absolute_error(test['Load'], predictions)
rmse = np.sqrt(mean_squared_error(test['Load'], predictions))

print(f'Mean Absolute Error (MAE): {mae}')
print(f'Root Mean Squared Error (RMSE): {rmse}')

# Memvisualisasikan prediksi dan data aktual
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(test.index, test['Load'], label='Actual Load')
plt.plot(test.index, predictions, label='Predicted Load', color='red')
plt.title('Electricity Load Prediction')

```

```
plt.legend()
plt.show()
# 5. Prediksi Beban Listrik Masa Depan
future_steps = 30 # Misal prediksi untuk 30 hari ke depan
future_predictions = model_fit.forecast(steps=future_steps)

print(future_predictions)
```

Penjelasan Kode :

1. Mengumpulkan Data: Data beban listrik dan tanggal dikumpulkan dalam format CSV dan diubah menjadi format *datetime* untuk index.
2. Pra-pemrosesan Data: *Missing values* diisi dengan interpolasi, dan data divisualisasikan untuk memahami tren.
3. Membuat Model ARIMA: Model ARIMA dibangun dengan parameter yang ditentukan (p , d , q). Parameter ini bisa ditentukan dengan analisis ACF dan PACF atau dengan metode grid search.
4. Evaluasi Model: Model dievaluasi menggunakan metrik MAE dan RMSE. Prediksi dibandingkan dengan data aktual.
5. Prediksi Beban Listrik Masa Depan: Model digunakan untuk memprediksi beban listrik untuk periode waktu di masa depan.

Prediksi beban listrik menggunakan model ARIMA adalah metode yang kuat untuk menangkap pola musiman dan tren dalam data beban listrik. Dengan implementasi yang tepat, perusahaan utilitas dapat merencanakan dan mengelola distribusi listrik dengan lebih efisien, memastikan pasokan listrik yang stabil dan andal.

2.2.3 Jaringan Saraf Tiruan (*Artificial Neural Networks*)

Teknologi kecerdasan buatan seperti jaringan saraf tiruan dapat digunakan untuk memodelkan hubungan kompleks antara variabel input (misalnya suhu udara, waktu, hari dalam seminggu) dan output (beban listrik) untuk memprediksi beban listrik di masa depan. Prediksi beban listrik menggunakan jaringan saraf tiruan (*neural networks*) adalah metode canggih yang dapat menangkap hubungan *non-linear* dalam data beban listrik. Dalam contoh ini, kita akan menggunakan LSTM (*Long Short-Term Memory*), yang

merupakan jenis RNN (*Recurrent Neural Network*) yang sangat cocok untuk data deret waktu.

Langkah-Langkah Prediksi Beban Listrik dengan LSTM :

1. Mengumpulkan Data
Beban Listrik: Data historis beban listrik, biasanya dalam interval jam, harian, atau mingguan.
2. Pra-pemrosesan Data
 - a. Normalisasi atau standarisasi data.
 - b. Membagi data menjadi set pelatihan dan pengujian.
 - c. Membuat data *sequence* untuk input LSTM.
3. Membangun dan Melatih Model LSTM
Menggunakan pustaka seperti Tensor Flow atau Keras di Python.
4. Evaluasi Model
Menggunakan metrik evaluasi seperti *Mean Absolute Error* (MAE) atau *Root Mean Squared Error* (RMSE).
5. Prediksi
Menggunakan model untuk memprediksi beban listrik di masa depan.

Contoh kode sederhana untuk prediksi beban listrik menggunakan LSTM dengan Python dan pustaka keras.

```
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from sklearn.preprocessing import MinMaxScaler
from sklearn.metrics import mean_absolute_error,
mean_squared_error
from keras.models import Sequential
from keras.layers import LSTM, Dense
```

1. Mengumpulkan Data

Misalkan kita punya data dalam file CSV dengan kolom 'Date' dan 'Load'

```
data = pd.read_csv('electricity_load.csv', parse_dates=['Date'],
index_col='Date')
```

2. Pra-pemrosesan Data

Mengisi missing values dengan interpolasi

```
data['Load'].interpolate(method='time', inplace=True)
```

Normalisasi data

```
scaler = MinMaxScaler(feature_range=(0, 1))
```

```
scaled_data = scaler.fit_transform(data['Load'].values.reshape(-1, 1))
```

Membuat data sequence untuk LSTM

```
def create_dataset(dataset, look_back=1):
```

```
    X, Y = [], []
```

```
    for i in range(len(dataset) - look_back - 1):
```

```
        a = dataset[i:(i + look_back), 0]
```

```
        X.append(a)
```

```
        Y.append(dataset[i + look_back, 0])
```

```
    return np.array(X), np.array(Y)
```

look_back = 60 # Menggunakan 60 hari terakhir untuk memprediksi hari berikutnya

```
X, Y = create_dataset(scaled_data, look_back)
```

Membagi data menjadi set pelatihan dan pengujian

```
train_size = int(len(X) * 0.8)
```

```
test_size = len(X) - train_size
```

```
X_train, X_test = X[:train_size], X[train_size:]
```

```
Y_train, Y_test = Y[:train_size], Y[train_size:]
```

Mengubah data menjadi bentuk [samples, time steps, features]

```
X_train = np.reshape(X_train, (X_train.shape[0], X_train.shape[1], 1))
```

```
X_test = np.reshape(X_test, (X_test.shape[0], X_test.shape[1], 1))
```

3. Membangun dan Melatih Model LSTM

```
model = Sequential()
```

```
model.add(LSTM(50, return_sequences=True, input_shape=(look_back, 1)))
```

```
model.add(LSTM(50, return_sequences=False))
```

```
model.add(Dense(25))
```

```
model.add(Dense(1))
```

```
model.compile(optimizer='adam', loss='mean_squared_error')  
model.fit(X_train, Y_train, batch_size=1, epochs=10)
```

```
# 4. Evaluasi Model
```

```
# Prediksi
```

```
predictions = model.predict(X_test)  
predictions = scaler.inverse_transform(predictions)
```

```
# Menghitung metrik evaluasi
```

```
Y_test_scaled = scaler.inverse_transform([Y_test])  
mae = mean_absolute_error(Y_test_scaled[0], predictions[:, 0])  
rmse = np.sqrt(mean_squared_error(Y_test_scaled[0], predictions[:, 0]))
```

```
print(f'Mean Absolute Error (MAE): {mae}')  
print(f'Root Mean Squared Error (RMSE): {rmse}')
```

```
# Memvisualisasikan prediksi dan data aktual
```

```
train = data[:train_size + look_back]  
valid = data[train_size + look_back:]  
valid['Predictions'] = predictions
```

```
plt.figure(figsize=(10, 6))  
plt.plot(train['Load'], label='Train Data')  
plt.plot(valid['Load'], label='Actual Load')  
plt.plot(valid['Predictions'], label='Predicted Load', color='red')  
plt.title('Electricity Load Prediction with LSTM')  
plt.legend()  
plt.show()
```

```
# 5. Prediksi Beban Listrik Masa Depan
```

```
# Menggunakan data terakhir untuk memprediksi masa depan
```

```
last_data = scaled_data[-look_back:]  
last_data = np.reshape(last_data, (1, look_back, 1))  
future_prediction = model.predict(last_data)  
future_prediction = scaler.inverse_transform(future_prediction)
```

```
print(f'Future Load Prediction: {future_prediction[0][0]}')
```

Penjelasan Kode :d

1. Mengumpulkan Data: Data beban listrik dan tanggal dikumpulkan dalam format CSV dan diubah menjadi format *datetime* untuk index.
2. Pra-pemrosesan Data: *Missing values* diisi dengan interpolasi, dan data dinormalisasi. Data sequence dibuat untuk input LSTM dengan *look_back* 60 hari.
3. Membangun dan melatih model LSTM: Model LSTM dibangun menggunakan pustaka Keras, dengan dua lapisan LSTM dan lapisan *dense* untuk output. Model dilatih dengan data pelatihan.
4. Evaluasi Model: Model dievaluasi menggunakan metrik MAE dan RMSE. Prediksi dibandingkan dengan data aktual.
5. Prediksi beban listrik masa depan: Model digunakan untuk memprediksi beban listrik untuk hari berikutnya menggunakan data terbaru.

Prediksi beban listrik menggunakan LSTM adalah metode yang kuat untuk menangkap pola musiman dan tren dalam data beban listrik. Dengan penerapan teknik *Deep Learning*, perusahaan utilitas dapat meningkatkan akurasi prediksi dan merencanakan distribusi listrik dengan lebih efisien.

2.2.4 Metode Ensemble

Metode ini menggabungkan beberapa model prediksi yang berbeda untuk meningkatkan akurasi prediksi. Contohnya adalah teknik seperti *Random Forest* atau *Gradient Boosting* yang menggabungkan prediksi dari banyak pohon keputusan. Metode *ensemble* dapat digunakan untuk meningkatkan akurasi prediksi beban listrik dengan menggabungkan kekuatan beberapa model pembelajaran mesin. Berikut ini adalah contoh penerapan metode *ensemble* untuk prediksi beban listrik menggunakan Python.

Langkah-langkah Implementasi :

1. Mengimpor pustaka yang diperlukan
2. Memuat dan mempersiapkan dataset
3. Melatih model dengan berbagai teknik *ensemble*
4. Evaluasi kinerja model

Untuk contoh ini, kita akan menggunakan dataset beban listrik publik, misalnya dataset dari UCI *Machine Learning Repository* tentang konsumsi energi rumah tangga. Namun, karena kita tidak memiliki akses langsung ke dataset tersebut, kita akan menggunakan dataset sintetis untuk demonstrasi.

```
# Importing necessary libraries
```

```
import numpy as np
```

```
import pandas as pd
```

```
from sklearn.model_selection import trainn_test_split
```

```
from sklearn.ensemble import RandomForestRegressor,  
GradientBoostingRegressor, StackingRegressor
```

```
from sklearn.linear_model import LinearRegression
```

```
from sklearn.metrics import mean_absolute_error,  
mean_squared_error
```

```
from sklearn.datasets import make_regression
```

```
# Generating synthetic dataset (replace with actual load dataset)
```

```
X, y = make_regression(n_samples=1000, n_features=10, noise=0.1,  
random_state=42)
```

```
# Splitting the dataset into training and testing sets
```

```
X_trainn, X_test, y_trainn, y_test = trainn_test_split(X, y, test_size=0.2,  
random_state=42)
```

```
# Random Forest (Bagging)
```

```
rf_model = RandomForestRegressor(n_estimators=100,  
random_state=42)
```

```
rf_model.fit(X_trainn, y_trainn)
```

```
rf_pred = rf_model.predict(X_test)
```

```
rf_mae = mean_absolute_error(y_test, rf_pred)
```

```
rf_rmse = np.sqrt(mean_squared_error(y_test, rf_pred))
```

```
print(f'Random Forest MAE: {rf_mae}, RMSE: {rf_rmse}')
```

```

# Gradient Boosting (Boosting)
gb_model = GradientBoostingRegressor(n_estimators=100,
random_state=42)
gb_model.fit(X_trainn, y_trainn)
gb_pred = gb_model.predict(X_test)
gb_mae = mean_absolute_error(y_test, gb_pred)
gb_rmse = np.sqrt(mean_squared_error(y_test, gb_pred))
print(f'Gradient Boosting MAE: {gb_mae}, RMSE: {gb_rmse}')

# Stacking Ensemble
base_learners = [
    ('rf', RandomForestRegressor(n_estimators=10,
random_state=42)),
    ('gb', GradientBoostingRegressor(n_estimators=10,
random_state=42))
]
meta_learner = LinearRegression()
stacking_model = StackingRegressor(estimators=base_learners,
final_estimator=meta_learner, cv=5)
stacking_model.fit(X_trainn, y_trainn)
stacking_pred = stacking_model.predict(X_test)
stacking_mae = mean_absolute_error(y_test, stacking_pred)
stacking_rmse = np.sqrt(mean_squared_error(y_test,
stacking_pred))
print(f'Stacking Ensemble MAE: {stacking_mae}, RMSE:
{stacking_rmse}')

```

Penjelasan Implementasi :

1. *Random Forest (Bagging)*
 - a. *Random Forest* adalah metode *ensemble* yang menggunakan teknik bagging untuk membangun beberapa pohon keputusan dari subset data yang diambil secara acak dan menggabungkan prediksinya.
 - b. Model ini melatih 100 pohon keputusan dan menggabungkan hasilnya.

2. *Gradient Boosting (Boosting)*

- a. *Gradient Boosting* membangun model secara berurutan, di mana setiap model baru berusaha untuk mengoreksi kesalahan dari model sebelumnya.
- b. Model ini menggunakan 100 estimator.

3. *Stacking Ensemble*

- a. *Stacking* menggabungkan beberapa model dasar (*base learners*) dan menggunakan model meta (*meta-learner*) untuk menggabungkan prediksi dari *base learners*.
- b. Dalam contoh ini, *Random Forest* dan *Gradient Boosting* digunakan sebagai *base learners*, dan *Linear Regression* sebagai *meta-learner*.

Kelebihan Metode Ensemble:

1. Meningkatkan Akurasi: Dengan menggabungkan beberapa model, metode *ensemble* sering kali memberikan prediksi yang lebih akurat.
2. Mengurangi *Overfitting*: Teknik seperti bagging mengurangi risiko *overfitting* dengan menggabungkan prediksi dari berbagai model.
3. Fleksibilitas: Metode *ensemble* dapat menggabungkan model-model yang berbeda untuk memanfaatkan kelebihan masing-masing model.

Kekurangan Metode Ensemble :

1. Kompleksitas: Model *ensemble* lebih kompleks dan sulit diinterpretasikan.
2. Waktu Komputasi: Membutuhkan lebih banyak waktu dan sumber daya komputasi.
3. Pemeliharaan: Lebih sulit untuk dipelihara dan diperbarui karena melibatkan banyak model.

2.2.5 Metode *Hybrid*

Prediksi beban listrik dengan metode *hybrid* adalah pendekatan yang menggabungkan berbagai teknik dan model untuk meningkatkan akurasi prediksi. Pendekatan ini mengombinasikan beberapa metode prediksi untuk memanfaatkan kekuatan masing-masing model. Misalnya,

kombinasi antara model regresi *linier* dengan jaringan saraf tiruan untuk meningkatkan akurasi prediksi. Metode *hybrid* bisa menggabungkan model statistik klasik seperti ARIMA dengan model pembelajaran mesin seperti *Long Short-Term Memory* (LSTM), atau menggabungkan beberapa model *ensemble* untuk memanfaatkan kelebihan masing-masing. Berikut adalah contoh implementasi metode *hybrid* untuk prediksi beban listrik menggunakan Python, menggabungkan model ARIMA (*Autoregressive Integrated Moving Average*) dengan model LSTM (*Long Short-Term Memory*) dari jaringan saraf tiruan.

Langkah-langkah Implementasi :

1. Mengimpor pustaka yang diperlukan
2. Memuat dan mempersiapkan dataset
3. Melatih model ARIMA untuk menangkap pola *linier*
4. Melatih model LSTM untuk menangkap pola *non-linier*
5. Menggabungkan prediksi dari kedua model

```
# Importing necessary libraries
```

```
import numpy as np
```

```
import pandas as pd
```

```
from sklearn.metrics import mean_absolute_error,  
mean_squared_error
```

```
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
from statsmodels.tsa.arima.model import ARIMA
```

```
from keras.models import Sequential
```

```
from keras.layers import LSTM, Dense
```

```
from keras.preprocessing.sequence import TimeseriesGenerator
```

```
# Assuming the dataset is a time series of electric load
```

```
# For demonstration, we generate synthetic data
```

```
np.random.seed(42)
```

```
data = np.cumsum(np.random.randn(1000) + 0.01 *  
np.arange(1000))
```

```
data = data.reshape(-1, 1)
```

```
# Splitting the data into training and testing sets
```

```
trainn_size = int(len(data) * 0.8)
```

```
trainn, test = data[:trainn_size], data[trainn_size:]
```

```
# ARIMA Model
```

```
arima_order = (5, 1, 0)
```

```
arima_model = ARIMA(trainn, order=arima_order)
```

```
arima_model_fit = arima_model.fit()
```

```
arima_pred = arima_model_fit.forecast(steps=len(test))
```

```
# Prepare data for LSTM
```

```
n_input = 10
```

```
generator = TimeseriesGenerator(trainn, trainn, length=n_input,  
batch_size=1)
```

```
# LSTM Model
```

```
lstm_model = Sequential()
```

```
lstm_model.add(LSTM(50,                                activation='relu',  
input_shape=(n_input, 1)))
```

```
lstm_model.add(Dense(1))
```

```
lstm_model.compile(optimizer='adam', loss='mse')
```

```
lstm_model.fit(generator, epochs=20)
```

```
# Forecasting with LSTM
```

```
lstm_predictions = []
```

```
batch = trainn[-n_input:].reshape((1, n_input, 1))
```

```
for i in range(len(test)):
```

```
    lstm_pred = lstm_model.predict(batch, verbose=0)
```

```
    lstm_predictions.append(lstm_pred[0][0])
```

```
    batch = np.append(batch[:, 1:, :], [[lstm_pred]], axis=1)
```

```
# Combining ARIMA and LSTM predictions
```

```
hybrid_pred = (arima_pred + lstm_predictions) / 2
```

```
# Evaluation
```

```
arima_rmse = np.sqrt(mean_squared_error(test, arima_pred))
```

```
lstm_rmse = np.sqrt(mean_squared_error(test,  
lstm_predictions))
```

```

hybrid_rmse = np.sqrt(mean_squared_error(test, hybrid_pred))

print(f'ARIMA RMSE: {arima_rmse}')
print(f'LSTM RMSE: {lstm_rmse}')
print(f'Hybrid RMSE: {hybrid_rmse}')

# Plotting the results
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(test, label='Actual')
plt.plot(arima_pred, label='ARIMA')
plt.plot(lstm_predictions, label='LSTM')
plt.plot(hybrid_pred, label='Hybrid')
plt.legend()
plt.show()

```

Penjelasan Implementasi:

1. Data Sintetis

Data sintetis digunakan untuk demonstrasi. Dataset asli untuk prediksi beban listrik akan berupa serangkaian data historis beban listrik pada interval waktu tertentu.
2. Model ARIMA
 - a. ARIMA adalah model statistik yang digunakan untuk menangkap pola *linier* dalam data *time series*.
 - b. Parameter ARIMA (5, 1, 0) berarti model menggunakan 5 lag untuk autoregression, 1 *differencing* untuk membuat data stasioner, dan 0 *moving average*.
3. Model LSTM
 - a. LSTM adalah jenis jaringan saraf tiruan yang efektif untuk menangani data *time series* dengan pola non-linier.
 - b. Model dilatih dengan menggunakan generator data *time series* untuk memprediksi langkah berikutnya.
4. Menggabungkan Prediksi

Prediksi dari model ARIMA dan LSTM digabungkan dengan cara merata-rata untuk menghasilkan prediksi *hybrid*.
5. Evaluasi Kinerja

Kinerja model dievaluasi menggunakan *Root Mean Squared Error* (RMSE). Nilai RMSE yang lebih rendah menunjukkan model yang lebih akurat.

Hasil evaluasi model ditunjukkan dalam nilai RMSE dari masing-masing model (ARIMA, LSTM, dan *Hybrid*). Model *hybrid* diharapkan memberikan nilai RMSE yang lebih rendah dibandingkan dengan model ARIMA atau LSTM secara individu, menunjukkan bahwa gabungan prediksi dari kedua model tersebut memberikan hasil yang lebih akurat.

2.3 Optimasi Sistem

Kecerdasan buatan dapat digunakan untuk mengoptimalkan alokasi sumber daya listrik dengan cara yang efisien dan hemat biaya. Hal ini melibatkan penentuan waktu dan jumlah listrik yang harus dialokasikan ke berbagai beban, seperti rumah tangga, industri, atau komersial, untuk meminimalkan biaya produksi listrik dan menghindari *overloading* jaringan.

Sistem kecerdasan buatan dapat digunakan untuk mengontrol tegangan dan frekuensi jaringan listrik secara otomatis. Hal ini membantu menjaga stabilitas sistem, menghindari kegagalan dan kerusakan peralatan, serta meningkatkan efisiensi penggunaan energi. Sistem kecerdasan buatan dapat melakukan pemantauan, analisis, dan pengambilan keputusan secara *real-time* untuk menyesuaikan kontrol tegangan dan frekuensi berdasarkan kondisi operasional yang dinamis.

Kecerdasan buatan dalam mengontrol tegangan dan frekuensi :

1. Pemantauan dan analisis *real-time*
 - a. Sensor dan IoT: Menggunakan sensor dan perangkat IoT untuk mengumpulkan data *real-time* tentang tegangan, frekuensi, arus, dan beban listrik di seluruh jaringan.
 - b. Analisis Data: kecerdasan buatan menganalisis data ini untuk mendeteksi anomali, memprediksi beban, dan mengidentifikasi kebutuhan penyesuaian dalam sistem.
2. Pengendalian Tegangan (*Voltage Control*)
 - a. Regulasi Otomatis: kecerdasan buatan mengendalikan perangkat seperti *transformator tap-changing*, *capacitor banks*, dan regulator tegangan untuk menjaga tingkat tegangan dalam batas yang diinginkan.

- b. Optimasi Penempatan: Menggunakan algoritma optimasi untuk menentukan penempatan optimal perangkat pengendali tegangan dalam jaringan untuk efisiensi maksimal.
- 3. Pengendalian Frekuensi (*Frequency Control*)
 - a. Respons Dinamis: kecerdasan buatan mengatur pembangkit listrik dan penyimpanan energi untuk merespons perubahan frekuensi dengan cepat, menjaga stabilitas frekuensi dalam jaringan.
 - b. Prediksi Beban dan Produksi: kecerdasan buatan memprediksi perubahan beban dan produksi listrik dari sumber energi terbarukan, memungkinkan respons yang lebih proaktif terhadap fluktuasi frekuensi.
- 4. Manajemen Energi Terdistribusi
 - a. Integrasi Energi Terbarukan: kecerdasan buatan membantu mengintegrasikan sumber energi terbarukan yang intermiten seperti tenaga surya dan angin dengan mengatur penyimpanan energi dan pembangkit listrik konvensional untuk menjaga stabilitas tegangan dan frekuensi.
 - b. *Demand Response*: kecerdasan buatan mengelola permintaan energi dengan mengurangi beban saat permintaan tinggi atau produksi rendah, menjaga keseimbangan antara penawaran dan permintaan.

2.4 Deteksi Anomali dan Keamanan

Kecerdasan buatan dapat digunakan untuk mendeteksi kebocoran atau gangguan dalam jaringan listrik, seperti hubungan pendek atau kerusakan pada peralatan. Sistem ini dapat secara otomatis mengidentifikasi lokasi masalah dan mengambil tindakan preventif atau korektif untuk memperbaiki alat yang dikendalikan.

Kecerdasan buatan dalam mendeteksi kebocoran dan gangguan :

- 1. Pemantauan *real-time*
 - a. Sensor dan IoT: Menggunakan sensor yang terpasang di berbagai titik dalam jaringan untuk mengumpulkan data

real-time tentang arus, tegangan, suhu, dan kondisi operasional kecerdasan buataannya.

- b. Pengolahan data: kecerdasan buatan menganalisis data yang dikumpulkan untuk mendeteksi anomali yang bisa menjadi indikasi kebocoran atau gangguan.

2. Analisis data historis dan prediksi

- a. *Machine Learning*: Menggunakan algoritma *machine learning* untuk mempelajari pola operasi normal dan mengenali penyimpangan dari pola ini.
- b. *Deep Learning*: Menggunakan jaringan saraf tiruan (*neural networks*), seperti CNN atau LSTM, untuk mendeteksi dan mengklasifikasikan jenis gangguan berdasarkan data historis.

3. Deteksi Anomali

- a. *Clustering*: Algoritma *clustering* seperti K-Means atau DBSCAN dapat digunakan untuk mengelompokkan data operasi normal dan mendeteksi titik data yang keluar dari kelompok ini sebagai anomali.
- b. *Classification*: Algoritma klasifikasi seperti *Random Forest*, SVM, atau jaringan saraf dapat digunakan untuk mengidentifikasi jenis gangguan tertentu.

4. Prediksi dan Perawatan Prediktif

- a. Prediksi Kerusakan: kecerdasan buatan dapat memprediksi kemungkinan kerusakan peralatan berdasarkan analisis pola penggunaan dan kondisi operasional.
- b. Perawatan Prediktif: Mengatur jadwal perawatan sebelum kerusakan terjadi berdasarkan prediksi kecerdasan buatan untuk mencegah gangguan.

2.5 Manajemen Energi Listrik

Manajemen energi listrik adalah proses yang melibatkan perencanaan, pengoperasian, dan pengoptimalan sistem pembangkit, distribusi, dan konsumsi energi listrik untuk memastikan penggunaan energi yang efisien, andal, dan berkelanjutan. Teknologi modern, termasuk kecerdasan buatan, memainkan peran penting dalam meningkatkan manajemen

energi listrik dengan memberikan kemampuan analisis yang lebih baik dan keputusan otomatis yang lebih cerdas. Kecerdasan buatan dapat digunakan untuk memantau dan mengelola jaringan listrik secara *real-time*. Ini termasuk pemantauan kondisi peralatan, analisis performa jaringan, dan pengambilan keputusan yang cepat dalam situasi darurat atau perubahan kondisi yang tidak terduga.

Kecerdasan buatan dalam Manajemen Energi Listrik :

1. Optimasi Distribusi Energi
 - a. Distribusi Cerdas: Kecerdasan buatan membantu mengoptimalkan distribusi energi di jaringan listrik, memastikan bahwa energi dikirim dengan efisien dari pembangkit listrik ke konsumen.
 - b. Penyeimbangan Beban: Kecerdasan buatan menyeimbangkan beban secara dinamis di seluruh jaringan untuk mencegah kelebihan beban pada titik-titik tertentu.
2. Pengelolaan Beban
 - a. Prediksi Beban: Algoritma pembelajaran mesin dapat memprediksi pola beban di masa depan berdasarkan data historis dan faktor eksternal seperti cuaca.
 - b. Pengendalian Permintaan: Kecerdasan buatan dapat mengelola permintaan energi dengan mengurangi atau menunda penggunaan di puncak permintaan, yang dikenal sebagai *Demand Response*.
3. Integrasi Energi Terbarukan
 - a. Prediksi Produksi: Kecerdasan buatan dapat memprediksi produksi energi dari sumber terbarukan seperti tenaga surya dan angin, yang sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca.
 - b. Manajemen Penyimpanan Energi: Kecerdasan buatan dapat mengoptimalkan penggunaan baterai dan sistem penyimpanan energi lainnya untuk menyimpan kelebihan energi terbarukan dan menggunakannya saat dibutuhkan.
4. Perawatan Prediktif
 - a. Deteksi Anomali: Algoritma Kecerdasan buatan dapat mendeteksi anomali dalam data operasional yang mungkin menunjukkan potensi kerusakan peralatan.

- b. Perawatan Berdasarkan Kondisi: Kecerdasan buatan dapat menentukan waktu optimal untuk melakukan perawatan berdasarkan analisis kondisi nyata peralatan.

DAFTAR PUSTAKA

- Box, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2015). *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Wiley.
- Chen, S., & Kusiak, A. (2015). "Optimization of Power Demand in Buildings With Electric Storage Heaters." *Energy*, 82, 89-98.
- Chollet, F. (2018). *Deep Learning with Python*. Manning Publications.
- EIA (Energy Information Administration). (2020). *Annual Energy Outlook 2020*. U.S. Department of Energy.
- European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators (ACER). (2021). *Artificial Intelligence and Electricity Market Regulation*. ACER.
- Fan, C., Xiao, F., & Zhao, Y. (2015). "A Short-Term Building Cooling Load Prediction Method Using Deep Learning Algorithms." *Applied Energy*, 195, 222-233
- Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep Learning*. MIT Press.
- Hamilton, J. D. (1994). *Time Series Analysis*. Princeton University Press.
- Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. Springer.
- Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2018). *Forecasting: Principles and Practice*. OTexts.
- Kristanto, A. (2004) *Kecerdasan Buatan*. Edisi Pertama. Yogyakarta. Penerbit: Graha Ilmu.
- Kusumadewi, S. (2003) *Artificial Intelligence (teknik dan aplikasinya)*. 1st edn. Yogyakarta. Penerbit: Graha Ilmu.
- Lopes, J. A. P., Hatziaargyriou, N., Mutale, J., Djapic, P., & Jenkins, N. (2007). "Integrating Distributed Generation into Electric Power Systems: A Review of Drivers, Challenges and Opportunities." *Electric Power Systems Research*, 77(9), 1189-1203.
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2012). *Introduction to Linear Regression Analysis*. Wiley.

- Priyono, A. and Rahmat, R.A.O.K. (2013) *Application of Artificial Intelligence for Urban Traffic Control System*. Edisi Asli. Jakarta. Penerbit : Mitra Wacana Media
- Siswanto (2010) *Kecerdasan Tiruan*. Edisi Kedu. Yogyakarta. Penerbit: Graha Ilmu.
- U.S. Department of Energy. (2020). *KECERDASAN BUATAN and the Future of Energy*. DOE.

BAB 3

PENINGKATAN EFISIENSI DAN PENGURANGAN EMISI

Oleh Rismen Sinambela

3.1 Pendahuluan

Dengan peningkatan efisiensi listrik, kita dapat mengurangi konsumsi energi listrik, mengurangi biaya energi, dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Menggunakan perangkat elektronik yang dirancang untuk mengkonsumsi sedikit energi listrik atau memiliki mode hemat daya dapat membantu meningkatkan efisiensi. Transformator yang efisien dapat mengurangi kehilangan daya saat mengubah tegangan listrik. Kabel listrik yang baik dan berkualitas dapat mengurangi kehilangan daya saat listrik dialirkan dari sumbernya ke perangkat yang menggunakan listrik. Penggunaan regulator tegangan yang tepat dapat membantu menjaga tegangan listrik dalam batas yang diinginkan dan mencegah pemborosan energi. Sistem otomatis untuk memantau dan mengatur konsumsi energi listrik di berbagai area atau perangkat dapat membantu mengidentifikasi dan mengurangi pemborosan energi. Beralih ke sumber energi terbarukan seperti panel surya atau turbin angin dapat membantu meningkatkan efisiensi energi listrik dengan mengurangi ketergantungan pada sumber energi yang tidak terbarukan. Pengelolaan beban dengan bijak dapat membantu menghindari overloading sistem dan mengoptimalkan penggunaan energi listrik. Isolasi yang baik pada sistem kelistrikan dapat membantu mengurangi kehilangan energi dalam bentuk panas. Menggunakan lampu LED yang efisien energi daripada lampu pijar tradisional dapat mengurangi konsumsi energi untuk pencahayaan. Pemakaian sistem pendinginan yang efisien di ruang server atau perangkat elektronik lainnya dapat membantu mengurangi konsumsi energi listrik. Meningkatkan komponen-

komponen tersebut dapat membantu meningkatkan efisiensi energi listrik secara keseluruhan.

Peningkatan efisiensi listrik memiliki dampak yang signifikan dalam pengurangan emisi gas rumah kaca dan polusi udara. Peningkatan efisiensi energi listrik mengurangi jumlah energi yang dibutuhkan untuk memenuhi kebutuhan listrik, sehingga mengurangi penggunaan bahan bakar fosil. Dengan demikian, peningkatan efisiensi listrik dapat mengurangi emisi gas rumah kaca seperti karbon dioksida (CO_2), metana (CH_4), dan nitrogen oksida (NO_x). Dengan mengurangi penggunaan bahan bakar fosil, peningkatan efisiensi energi listrik juga mengurangi emisi polutan udara seperti sulfur dioksida (SO_2), nitrogen oksida (NO_x), dan partikulat. Ini dapat mengurangi dampak negatif terhadap kesehatan manusia dan lingkungan akibat polusi udara. Peningkatan efisiensi peralatan listrik seperti AC, pemanas, dan sistem ventilasi dalam ruangan juga dapat meningkatkan kualitas udara dalam ruangan dengan mengurangi emisi polutan dan senyawa yang menyebabkan alergi.

Peningkatan efisiensi listrik mengurangi permintaan akan bahan bakar fosil seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam. Pengurangan konsumsi bahan bakar fosil juga dapat mengurangi ketergantungan pada impor energi, meningkatkan keamanan energi suatu negara. Dengan mengurangi emisi gas rumah kaca dan polusi udara, peningkatan efisiensi listrik dapat meningkatkan kesehatan masyarakat dan mengurangi biaya perawatan kesehatan akibat penyakit yang terkait dengan polusi udara.

Dengan adanya permintaan yang lebih besar untuk teknologi efisiensi energi, peningkatan efisiensi listrik juga dapat mendorong inovasi dalam pengembangan teknologi energi bersih dan ramah lingkungan. Peningkatan efisiensi listrik memiliki dampak yang luas dalam pengurangan emisi gas rumah kaca dan polusi udara, serta memberikan manfaat ekonomi dan kesehatan yang signifikan bagi masyarakat. Oleh karena itu, investasi dalam peningkatan efisiensi listrik merupakan langkah penting dalam mencapai tujuan

pembangunan berkelanjutan dan mitigasi perubahan iklim global.

3.2 Pengertian Efisiensi Listrik

Efisiensi listrik adalah rasio antara output energi listrik yang berguna dengan input energi listrik yang digunakan untuk menghasilkan output tersebut. Dalam konteks penggunaan energi listrik, efisiensi mengacu pada seberapa baik energi listrik yang digunakan untuk melakukan suatu pekerjaan atau menyediakan suatu layanan dibandingkan dengan energi total yang digunakan. Dalam rumah tangga, efisiensi listrik dapat diukur dari seberapa efisien peralatan listrik yang digunakan, seperti lampu, mesin cuci, kulkas, dan peralatan elektronik lainnya dalam mengubah energi listrik menjadi layanan yang diinginkan, seperti cahaya, panas, atau gerakan. Sementara itu, dalam industri, efisiensi listrik dapat diukur dari seberapa efisien proses produksi dan distribusi energi listrik, mulai dari pembangkitan energi listrik hingga pengiriman energi listrik ke konsumen akhir.

Peningkatan efisiensi listrik merupakan upaya untuk mengurangi konsumsi energi listrik tanpa mengurangi kualitas layanan yang diberikan. Hal ini dapat dilakukan melalui penggunaan peralatan listrik yang lebih efisien, pengoptimalan proses produksi dan distribusi energi listrik, serta perubahan kebiasaan penggunaan energi listrik.

Energi listrik merupakan salah satu sumber energi yang paling banyak digunakan di berbagai sektor kehidupan, mulai dari rumah tangga, industri, transportasi, hingga komunikasi. Namun, penggunaan energi listrik yang tidak efisien dapat menyebabkan berbagai masalah, seperti peningkatan konsumsi energi, kenaikan biaya energi, serta dampak negatif terhadap lingkungan.

1. Mengurangi Konsumsi Energi. Peningkatan efisiensi listrik merupakan salah satu cara efektif untuk mengurangi konsumsi energi. Dengan menggunakan peralatan listrik yang lebih efisien, kita dapat melakukan pekerjaan yang sama atau menyediakan layanan yang sama dengan

menggunakan lebih sedikit energi listrik. Hal ini tidak hanya membantu mengurangi biaya energi, tetapi juga mengurangi tekanan pada pasokan energi listrik dan mengurangi risiko terjadinya pemadaman listrik.

2. Mengurangi Biaya Energi. Peningkatan efisiensi listrik juga dapat membantu mengurangi biaya energi. Dengan menggunakan peralatan listrik yang lebih efisien, kita dapat mengurangi tagihan listrik bulanan kita. Selain itu, investasi dalam teknologi dan metode peningkatan efisiensi listrik juga dapat menghasilkan pengembalian investasi dalam jangka waktu yang relatif singkat melalui penghematan biaya energi.
3. Mengurangi Dampak Negatif Terhadap Lingkungan. Peningkatan efisiensi listrik juga merupakan salah satu cara untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Penggunaan energi listrik yang tidak efisien dapat menyebabkan peningkatan emisi gas rumah kaca dan pencemaran lingkungan lainnya. Dengan menggunakan energi listrik secara lebih efisien, kita dapat mengurangi emisi gas rumah kaca dan memperlambat proses pemanasan global.
4. Menyediakan Energi yang Lebih Terjangkau dan Berkelanjutan. Dengan meningkatkan efisiensi penggunaan energi listrik, kita juga dapat menyediakan energi yang lebih terjangkau dan berkelanjutan bagi masyarakat. Dengan mengurangi konsumsi energi listrik, kita dapat mengurangi tekanan pada pasokan energi listrik, sehingga harga energi listrik dapat tetap terjangkau bagi semua orang.

Dengan demikian, peningkatan efisiensi listrik merupakan salah satu langkah penting yang harus diambil untuk mengurangi konsumsi energi, mengurangi biaya energi, mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan, dan menyediakan energi yang lebih terjangkau dan berkelanjutan bagi masyarakat.

3.3 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Efisiensi Listrik

3.3.1 Jenis peralatan listrik

Jenis Peralatan Listrik yang Mempengaruhi Efisiensi Listrik, antara lain Lampu LED: Lampu LED lebih efisien daripada lampu pijar konvensional karena menghasilkan lebih sedikit panas dan lebih banyak cahaya untuk setiap watt energi yang digunakan. Lampu hemat energi. Meskipun tidak seefisien lampu LED, lampu CFL masih lebih efisien daripada lampu pijar konvensional. Peralatan elektronik rumah tangga kulkas, kulkas dengan label energi yang tinggi lebih efisien dalam penggunaan energi daripada model yang lebih tua. Mesin cuci dan pengering dengan teknologi penghemat energi dapat mengurangi konsumsi energi secara signifikan. Peralatan elektronik hiburan TV LED lebih efisien daripada TV layar tabung. TV pintar yang dilengkapi dengan fitur penghemat energi juga dapat mengurangi konsumsi energi. Perangkat komputer dan elektronik Laptop lebih efisien daripada komputer desktop dalam penggunaan energi. Charger yang tidak dicabut dari stopkontak dapat terus mengonsumsi energi bahkan ketika tidak digunakan. Peralatan listrik industri mesin dan peralatan industri: Penggunaan mesin dan peralatan industri yang efisien energi dapat mengurangi konsumsi energi secara signifikan. Sistem pemanas, ventilasi, dan pendingin udara yang efisien energi dapat mengurangi konsumsi energi dalam lingkungan industri. Peralatan elektronik kantor komputer dan perangkat kantor, pemilihan perangkat komputer dan elektronik kantor yang efisien energi dapat mengurangi konsumsi energi di lingkungan kantor. Pemilihan peralatan listrik yang lebih efisien adalah langkah penting dalam meningkatkan efisiensi penggunaan energi listrik dalam rumah tangga, industri, dan komersial.

3.3.2 Kondisi penggunaan listrik

Kondisi penggunaan listrik yang mempengaruhi efisiensi listrik penggunaan berlebihan standby mode seperti Peralatan listrik yang tetap dalam mode standby (misalnya, TV, charger, atau

komputer) tetap mengonsumsi energi, meskipun tidak digunakan secara aktif. Overload yaitu penggunaan listrik yang berlebihan, seperti menyalakan terlalu banyak peralatan listrik secara bersamaan, dapat mengurangi efisiensi penggunaan energi listrik.

Kebocoran energi kabel yang tidak dihubungkan dengan baik: Kebocoran energi dapat terjadi jika kabel tidak terhubung dengan baik atau peralatan listrik mengalami kerusakan. Penggunaan peralatan tua dan rusak: Peralatan listrik yang tua atau rusak cenderung mengalami kebocoran energi dan menjadi kurang efisien dalam penggunaan energi. Penggunaan pada waktu yang tepat, penggunaan pada puncak dan Luar Jam puncak yaitu Penggunaan energi listrik pada jam puncak cenderung lebih mahal dan kurang efisien daripada penggunaan energi pada jam-jam non-puncak.

Pengaturan dan pemeliharaan pengaturan suhu yang tidak tepat pada peralatan elektronik misalnya Pengaturan suhu yang tidak tepat pada peralatan elektronik, seperti kulkas atau pendingin udara, dapat mengurangi efisiensi penggunaan energi listrik. Pemeliharaan yang tidak teratur: Pemeliharaan yang tidak teratur pada peralatan listrik, seperti kulkas atau AC, dapat mengurangi efisiensi penggunaan energi listrik.

Kebiasaan penggunaan penggunaan peralatan secara berlebihan yaitu kebiasaan menggunakan peralatan listrik secara berlebihan, seperti meninggalkan lampu menyala saat meninggalkan ruangan, dapat mengurangi efisiensi penggunaan energi listrik. Kebiasaan penggunaan yang tidak efisien: Kebiasaan penggunaan yang tidak efisien, seperti membuka pintu kulkas terlalu sering, dapat meningkatkan konsumsi energi listrik secara signifikan.

3.3.3 Kebiasaan penggunaan listrik

1. Kebiasaan penggunaan listrik yang mempengaruhi efisiensi listrik antara lain Penggunaan lampu menggunakan lampu yang tidak diperlukan, kebiasaan meninggalkan lampu menyala di ruangan yang tidak digunakan dapat mengurangi efisiensi penggunaan energi listrik. Disamping itu Tidak mematikan lampu saat meninggalkan ruangan, tidak

- mematikan lampu saat meninggalkan ruangan juga dapat mengurangi efisiensi penggunaan energi listrik.
2. Tidak Mencabut Charger dari Stopkontak Setelah Pengisian: Kebiasaan tidak mencabut charger dari stopkontak setelah pengisian dapat menyebabkan kebocoran energi dan mengurangi efisiensi penggunaan energi listrik. Meninggalkan Peralatan dalam Mode Standby: Tidak mematikan peralatan elektronik seperti TV, komputer, atau konsol game, yang tetap dalam mode standby dapat mengurangi efisiensi penggunaan energi listrik.
 3. Membuka pintu kulkas terlalu sering atau tidak menutup pintu kulkas dengan rapat dapat mengurangi efisiensi penggunaan energi listrik. Penggunaan AC dan pemanas yang berlebihan: Penggunaan AC dan pemanas secara berlebihan dapat mengurangi efisiensi penggunaan energi listrik.
 4. Pengaturan suhu yang tidak tepat pada AC dan pemanas: Pengaturan suhu yang terlalu rendah pada AC atau terlalu tinggi pada pemanas dapat mengurangi efisiensi penggunaan energi listrik. Menggunakan lampu berlebihan: Menggunakan terlalu banyak lampu atau lampu dengan daya yang terlalu tinggi dapat mengurangi efisiensi penggunaan energi listrik.
 5. Meninggalkan peralatan elektronik menyala saat tidak digunakan: Tidak mematikan komputer, printer, atau peralatan elektronik lainnya saat tidak digunakan dapat mengurangi efisiensi penggunaan energi listrik di tempat kerja. Menggunakan peralatan listrik yang tidak efisien: Menggunakan peralatan listrik yang tidak efisien, seperti mesin fotokopi atau peralatan dapur, juga dapat mengurangi efisiensi penggunaan energi listrik.
 6. Meninggalkan penerangan menyala di tempat umum: Tidak mematikan lampu atau penerangan di tempat umum, seperti koridor atau tangga, saat tidak digunakan juga dapat mengurangi efisiensi penggunaan energi listrik.

3.3.4 Teknologi dan Metode Peningkatan Efisiensi Listrik

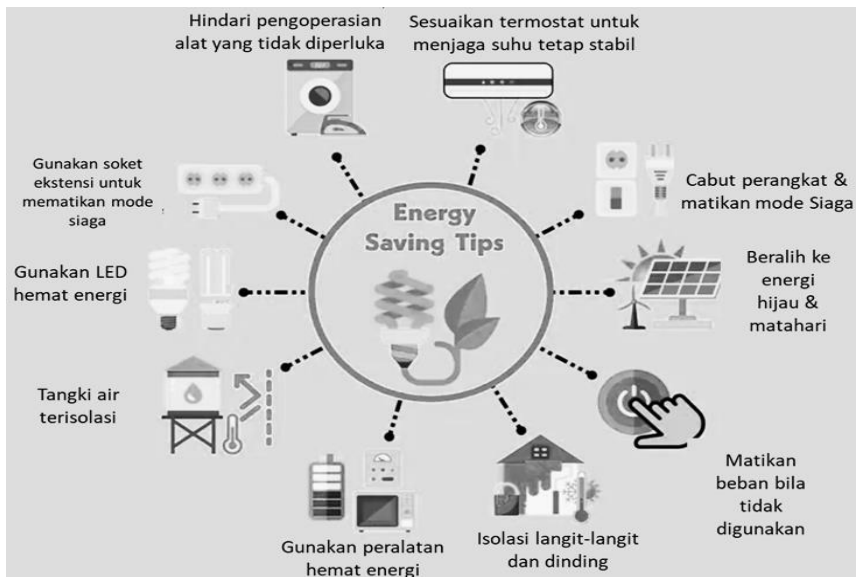
Terdapat beberapa teknologi dan metode yang dapat digunakan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan listrik, di antaranya:

1. Lampu LED (*Light Emitting Diode*) merupakan salah satu teknologi pencahayaan paling efisien yang tersedia saat ini. Lampu LED menghasilkan cahaya dengan menggunakan energi listrik yang lebih sedikit dibandingkan dengan lampu pijar konvensional. Lampu LED memiliki umur pakai yang lebih panjang dan menghasilkan panas yang lebih sedikit, sehingga mengurangi konsumsi energi secara signifikan.
2. Memilih peralatan listrik yang memiliki label energi tinggi, seperti label ENERGY STAR di Amerika Serikat atau label EU *Energy Efficiency* di Uni Eropa, dapat membantu mengidentifikasi peralatan listrik yang lebih efisien. Peralatan listrik dengan label energi tinggi cenderung menggunakan energi listrik lebih efisien daripada peralatan dengan label energi rendah.
3. Penggunaan teknologi hemat energi, seperti pengatur suhu otomatis, sensor cahaya, dan sistem otomatisasi rumah pintar, dapat membantu mengurangi konsumsi energi listrik secara signifikan. Di industri, penggunaan teknologi hemat energi, seperti motor listrik variabel kecepatan (VSD), sistem manajemen energi, dan sistem pemantauan energi, dapat membantu meningkatkan efisiensi penggunaan energi listrik.
4. Pemanfaatan sumber energi terbarukan, seperti energi surya dan energi angin, dapat membantu meningkatkan efisiensi penggunaan energi listrik. Dengan menggunakan energi terbarukan, kita dapat mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil dan mengurangi emisi gas rumah kaca.
5. Pengoptimalan proses produksi dan distribusi energi listrik dapat membantu mengurangi kerugian energi selama proses produksi dan distribusi. Teknologi seperti transformator yang lebih efisien, sistem transmisi yang lebih canggih, dan penggunaan sistem kelistrikan cerdas dapat

membantu meningkatkan efisiensi produksi dan distribusi energi listrik.

6. Pendidikan dan kesadaran masyarakat tentang pentingnya efisiensi energi listrik juga merupakan faktor penting dalam peningkatan efisiensi penggunaan energi listrik. Program-program edukasi dan kampanye kesadaran masyarakat dapat membantu mengubah kebiasaan penggunaan energi listrik yang tidak efisien. Dengan menggunakan teknologi dan metode peningkatan efisiensi listrik yang tepat, kita dapat mengurangi konsumsi energi listrik, mengurangi biaya energi, dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

Listrik merupakan komoditas vital dalam kehidupan kita sehari-hari. Dengan menggunakannya untuk penerangan, menyalakan perangkat elektronik, pemanas, dan mendinginkan rumah atau kantor, dan lain-lain. Banyak orang mencari cara untuk mengurangi tagihan listrik mereka. Berikut adalah langkah-langkah cara menghemat listrik dan konsumsi daya untuk mengurangi tagihan listrik.



Gambar 3.1. Langkah menghemat energi

<https://www.pinterest.com/pin/12-steps-to-save-electricity--475270566939346502/>.

1. Penggunaan lampu Light Emitting Diode (LED)

Lampu LED dikenal lebih ramah lingkungan karena tidak mengandung material yang berbahaya bagi kesehatan dan lingkungan. Lampu LED sendiri menghasilkan emisi atau gas buang berupa karbon dioksida sebesar 202.95 kg setiap tahunnya, kurang dari setengah emisi yang dihasilkan lampu Compact Fluorescent Lamp (CFL) Penggunaan lampu LED dalam peningkatan efisiensi Listrik. Lampu LED adalah jenis lampu yang menggunakan teknologi semikonduktor untuk menghasilkan cahaya. Cahaya pada lampu LED dihasilkan ketika elektron bergerak melalui semikonduktor dan bertemu dengan lubang, menghasilkan foton cahaya. Lampu LED menggunakan energi listrik yang lebih sedikit untuk menghasilkan cahaya yang sama dengan lampu pijar konvensional. Umur Pakai yang Panjang: Lampu LED memiliki umur pakai yang jauh lebih panjang dibandingkan dengan lampu pijar konvensional, sehingga mengurangi kebutuhan akan penggantian lampu. Panas yang Rendah: Lampu LED menghasilkan sedikit panas dibandingkan dengan lampu pijar konvensional, sehingga mengurangi konsumsi energi listrik yang terbuang untuk menghasilkan panas. Lampu LED tidak mengandung merkuri, sehingga lebih ramah lingkungan dan lebih aman untuk dibuang.

Penggantian lampu pijar konvensional dengan lampu LED di rumah tangga dapat mengurangi konsumsi energi listrik secara signifikan dan menghemat biaya energi.

Penggunaan lampu LED di industri dapat membantu mengurangi konsumsi energi listrik dan biaya operasional. Lampu LED digunakan secara luas untuk penerangan jalan raya karena efisiensinya yang tinggi dan umur pakainya yang panjang.

Penerapan lampu LED dapat mengurangi konsumsi energi listrik hingga 75% dibandingkan dengan lampu pijar konvensional. Pengurangan Biaya Operasional: Umur pakai yang panjang dan konsumsi energi yang rendah membuat lampu LED menjadi pilihan yang ekonomis dalam jangka

panjang. Dampak Lingkungan yang Lebih Rendah: Penggunaan lampu LED membantu mengurangi emisi gas rumah kaca dan polusi udara karena mengurangi konsumsi energi listrik dari sumber energi fosil. Banyak negara telah menerapkan program subsidi atau insentif untuk mendorong penggunaan lampu LED. Program ini termasuk pemberian insentif pajak, subsidi harga, dan program penukaran lampu pijar konvensional dengan lampu LED. Penerapan lampu LED adalah salah satu cara paling efektif untuk meningkatkan efisiensi penggunaan energi listrik, mengurangi biaya operasional, dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

2. Pemilihan peralatan listrik berlabel energi

Label energi adalah label yang menunjukkan tingkat efisiensi energi dari suatu produk.

Label energi biasanya dikeluarkan oleh badan atau lembaga pemerintah yang mengatur standar efisiensi energi. Peralatan listrik dengan label energi tinggi cenderung menggunakan energi listrik secara lebih efisien dibandingkan dengan peralatan yang tidak memiliki label energi. Peralatan listrik berlabel energi tinggi cenderung lebih hemat energi, sehingga dapat mengurangi biaya listrik bulanan. Dengan menggunakan peralatan listrik yang lebih efisien energi, kita dapat mengurangi konsumsi energi listrik dari sumber energi fosil dan mengurangi emisi gas rumah kaca.

Kulkas dengan label energi tinggi cenderung menggunakan energi listrik lebih efisien, sehingga mengurangi biaya operasional dan dampak lingkungan. Mesin cuci dengan label energi tinggi menggunakan lebih sedikit air dan energi listrik dibandingkan dengan model yang lebih tua. AC (*Air Conditioner*) dengan label energi tinggi memiliki koefisien performa (COP) yang lebih tinggi, sehingga lebih efisien dalam pendinginan ruangan. Lampu dengan label ENERGY STAR atau label EU Energy Efficiency biasanya lebih efisien dalam penggunaan energi listrik.

Pastikan untuk memeriksa label energi pada peralatan listrik sebelum membelinya. Bandingkan berbagai model peralatan listrik dan pilih yang memiliki label energi tertinggi. Selain harga beli, pertimbangkan juga biaya operasional peralatan dalam jangka waktu yang lebih panjang.

3. Penggunaan teknologi hemat energi di rumah tangga dan industri

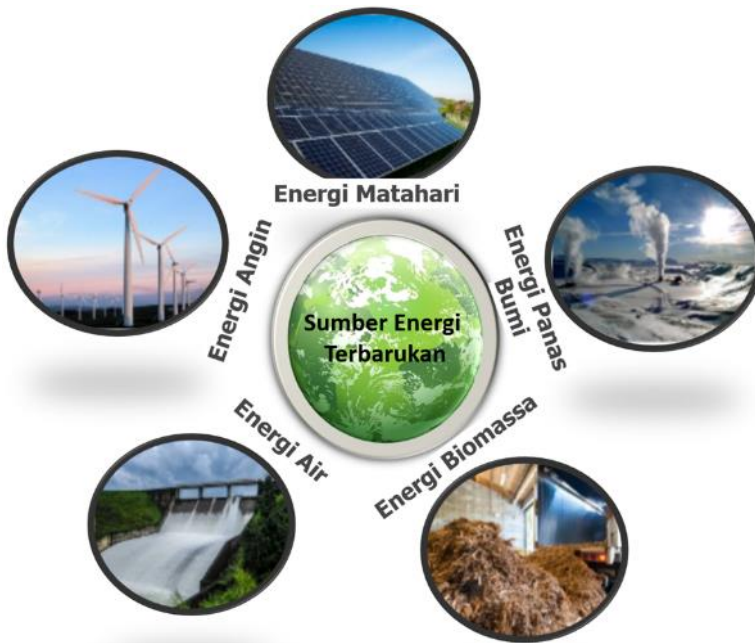
Penggunaan teknologi hemat energi di rumah tangga dan industri untuk meningkatkan efisiensi listrik. Thermostat pintar memungkinkan pengguna untuk mengatur suhu rumah secara otomatis berdasarkan jadwal atau preferensi, mengurangi konsumsi energi listrik dari pemanas dan pendingin udara. Sensor cahaya dapat digunakan untuk mengaktifkan atau mematikan lampu secara otomatis berdasarkan tingkat cahaya alami yang ada, mengurangi penggunaan energi listrik yang tidak perlu. Sistem otomatisasi rumah pintar memungkinkan pengguna untuk mengontrol peralatan listrik seperti lampu, AC, dan perangkat lainnya secara jarak jauh melalui smartphone, mengoptimalkan penggunaan energi listrik. Industri juga dapat melakukan efisiensi antara lain. Motor listrik variabel kecepatan dapat mengubah kecepatan operasi sesuai dengan kebutuhan, mengurangi konsumsi energi listrik saat beban operasional berkurang. Sistem manajemen energi memungkinkan perusahaan untuk memantau dan mengelola konsumsi energi listrik secara real-time, mengidentifikasi potensi penghematan energi. Sistem pemantauan energi memberikan informasi tentang performa peralatan listrik, mengidentifikasi peralatan yang tidak efisien atau membutuhkan perawatan, dan membantu mengoptimalkan penggunaan energi listrik. Penggunaan teknologi hemat energi dapat mengurangi konsumsi energi listrik, menghemat biaya operasional, dan mengurangi dampak lingkungan. Dengan mengoptimalkan penggunaan energi listrik, baik di rumah tangga maupun industri, efisiensi operasional dapat ditingkatkan, meningkatkan

produktivitas dan profitabilitas. Banyak pemerintah mendorong penggunaan teknologi hemat energi dengan memberikan insentif pajak, subsidi harga, dan program penukaran peralatan lama dengan peralatan baru yang lebih efisien.

Penggunaan teknologi hemat energi di rumah tangga dan industri merupakan langkah penting dalam meningkatkan efisiensi penggunaan energi listrik, mengurangi biaya operasional, dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

4. Pemanfaatan energi terbarukan untuk meningkatkan efisiensi listrik

Energi terbarukan adalah sumber energi yang diperoleh dari sumber alam yang tidak terbatas dan dapat diperbaharui, seperti matahari, angin, air, dan biomassa. Pemanfaatan energi terbarukan memungkinkan kita untuk menghasilkan energi listrik tanpa menghasilkan emisi gas rumah kaca atau polusi udara. Jenis Energi Terbarukan yang Umum Digunakan antara lain, panel surya mengubah energi matahari menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaiik. Sistem pemanas air surya menggunakan energi matahari untuk memanaskan air, mengurangi konsumsi energi listrik dari pemanas air listrik. Turbin angin mengubah energi angin menjadi energi mekanis yang kemudian diubah menjadi energi listrik oleh generator. Pembangunan farm angin di lahan terbuka memungkinkan penghasilan energi listrik dalam skala besar. Pembangkit listrik tenaga air menggunakan energi air untuk menggerakkan turbin yang menghasilkan energi listrik. Pembangkit listrik mikrohidro cocok untuk digunakan di daerah terpencil dan memanfaatkan aliran air sungai kecil. Pembangkit listrik biomassa menggunakan bahan-bahan organik seperti limbah pertanian, limbah makanan, atau limbah kayu untuk menghasilkan energi listrik.



Gambar 3.2. Sumber energi terbarukan yang umum

Energi terbarukan berasal dari sumber alam yang tidak terbatas dan dapat diperbaharui secara alami. Pemanfaatan energi terbarukan mengurangi emisi gas rumah kaca dan polusi udara, membantu mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Pengurangan Ketergantungan pada bahan bakar fosil pemanfaatan energi terbarukan membantu mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil yang semakin langka dan mahal.

Sinar matahari yang melimpah sepanjang tahun membuat energi surya menjadi pilihan yang potensial. Panel surya dipasang di atap rumah, bangunan komersial, dan fasilitas umum. Proyek-proyek tenaga surya skala besar juga mulai berkembang, terutama di daerah-daerah dengan intensitas cahaya matahari yang tinggi seperti Nusa Tenggara Timur dan Nusa Tenggara Barat. Indonesia memiliki potensi panas bumi yang sangat besar karena letak geografisnya di Cincin Api Pasifik. Wilayah seperti Jawa, Sumatra, dan Sulawesi memiliki cadangan panas bumi yang

signifikan. Energi panas bumi di Indonesia dimanfaatkan untuk pembangkit listrik dan telah dikembangkan di berbagai lokasi seperti Dieng, Patuha, dan Sarulla. Wilayah Indonesia yang berbatasan dengan laut memiliki potensi energi angin yang cukup besar. Pembangkit listrik tenaga angin telah dikembangkan di beberapa lokasi seperti di Sidrap, Sulawesi Selatan, dan Bantul, Yogyakarta. Energi angin di Indonesia digunakan untuk pembangkit listrik skala kecil hingga menengah. Indonesia memiliki banyak sungai dan aliran air yang bisa dimanfaatkan untuk pembangkit listrik tenaga air. Pembangkit listrik tenaga air berskala besar seperti PLTA Cirata di Jawa Barat dan PLTA Sigura-gura di Sumatra Utara telah lama beroperasi. Selain itu, pembangkit listrik tenaga mikrohidro juga dikembangkan di daerah-daerah terpencil untuk memenuhi kebutuhan listrik lokal. Indonesia yang kaya akan hasil pertanian dan perkebunan memiliki potensi besar untuk bioenergi. Limbah pertanian seperti sekam padi, kelapa sawit, dan kayu bakar dapat diolah menjadi biomassa. Selain itu, biogas dari limbah ternak dan sampah organik juga mulai banyak dimanfaatkan, terutama di daerah pedesaan. Pemanfaatan energi terbarukan merupakan langkah penting dalam meningkatkan efisiensi penggunaan energi listrik, mengurangi biaya operasional, dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

5. Program dan Kebijakan Pemerintah dalam Peningkatan Efisiensi Listrik

Pemerintah memiliki peran yang sangat penting dalam meningkatkan efisiensi penggunaan energi listrik. Melalui berbagai program dan kebijakan, pemerintah dapat mendorong masyarakat dan industri untuk menggunakan energi listrik secara lebih efisien. Efisiensi energi merupakan salah satu cara paling efektif untuk mengurangi konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca. Peningkatan efisiensi listrik dapat mengurangi biaya energi, meningkatkan daya saing industri, dan mengurangi ketergantungan pada energi fosil. Pemerintah memiliki

peran kunci dalam mendorong penggunaan energi listrik yang lebih efisien melalui berbagai program dan kebijakan. Langkah-langkah ini dapat mencakup insentif fiskal, regulasi, standar efisiensi, dan program edukasi. Tujuan program dan kebijakan pemerintah adalah. Meningkatkan efisiensi penggunaan energi listrik di berbagai sektor, termasuk rumah tangga, industri, transportasi, dan sektor publik dan Mengurangi konsumsi energi listrik, mengurangi biaya operasional, dan mengurangi dampak lingkungan. Dengan adanya program dan kebijakan pemerintah yang tepat, diharapkan dapat tercapai peningkatan efisiensi penggunaan energi listrik secara menyeluruh, membawa manfaat ekonomi dan lingkungan yang signifikan.

6. Labeling energi

Labeling energi adalah sistem penilaian yang digunakan untuk memberikan informasi kepada konsumen tentang tingkat efisiensi energi suatu produk. Label energi biasanya dikeluarkan oleh badan atau lembaga pemerintah yang mengatur standar efisiensi energi. Label energi memberikan informasi tentang tingkat efisiensi energi suatu produk, memungkinkan konsumen untuk membandingkan dan memilih produk yang lebih efisien. Dengan mengetahui tingkat efisiensi energi suatu produk, konsumen cenderung memilih produk yang lebih efisien, sehingga mendorong produsen untuk memproduksi produk yang lebih ramah lingkungan. Produk dengan label ENERGY STAR telah memenuhi standar efisiensi energi yang ditetapkan oleh Environmental Protection Agency (EPA) di Amerika Serikat. Produk yang memenuhi standar ini cenderung lebih hemat energi daripada produk sejenis yang tidak memiliki label ENERGY STAR.

Label ini digunakan untuk memberikan informasi tentang tingkat efisiensi energi suatu produk di Uni Eropa. Produk dengan label ini telah memenuhi standar efisiensi energi yang ditetapkan oleh Uni Eropa.

Label energi menyediakan informasi tentang konsumsi energi suatu produk dalam bentuk kilowatt-hour (kWh)

atau nilai tertentu sesuai dengan jenis produknya. Produk diberi peringkat berdasarkan tingkat efisiensi energinya, misalnya dari kelas A (paling efisien) hingga G (paling tidak efisien). Selain itu, label energi juga dapat menyediakan informasi tambahan, seperti konsumsi air (untuk produk seperti mesin cuci) atau emisi CO₂ (untuk kendaraan). Label energi membantu meningkatkan kesadaran konsumen tentang pentingnya efisiensi energi dan membantu mereka membuat pilihan yang lebih bijaksana saat membeli produk. Untuk memenuhi standar efisiensi energi yang ditetapkan, produsen cenderung mengembangkan produk yang lebih efisien secara energi, mendorong inovasi dalam desain produk.

7. Insentif pajak untuk teknologi efisiensi energi

Insentif pajak adalah salah satu bentuk dukungan dari pemerintah untuk mendorong penggunaan teknologi efisiensi energi. Melalui insentif ini, pemerintah memberikan keringanan pajak atau pengurangan bea kepada individu, bisnis, atau industri yang menggunakan atau mengadopsi teknologi efisiensi energi. Berikut adalah penjelasan mengenai insentif pajak untuk teknologi efisiensi energi. Insentif pajak bertujuan untuk mendorong investasi dalam teknologi efisiensi energi dengan memberikan keringanan pajak atau pengurangan bea kepada individu, perusahaan, atau industri yang mengadopsi teknologi tersebut. Dengan memberikan insentif pajak, pemerintah berharap dapat mengurangi konsumsi energi, meningkatkan efisiensi energi, dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

Pemerintah memberikan pengurangan atau keringanan pajak kepada individu atau perusahaan yang mengadopsi teknologi efisiensi energi. Pemerintah menghapuskan atau mengurangi bea impor untuk produk-produk teknologi efisiensi energi yang diimpor. Pemerintah memberikan kredit pajak kepada individu atau perusahaan yang menginvestasikan dana mereka dalam teknologi efisiensi energi. Pemerintah memberikan kemungkinan

untuk mengurangi jumlah penghasilan yang dikenakan pajak untuk biaya-biaya yang terkait dengan pembelian dan instalasi teknologi efisiensi energi. Pemerintah memberikan insentif pajak khusus untuk teknologi energi terbarukan, seperti panel surya, turbin angin, atau sistem pemanas air tenaga surya.

Insentif pajak membuat teknologi efisiensi energi lebih terjangkau bagi individu, perusahaan, atau industri. Dengan adanya insentif pajak, perusahaan cenderung untuk mengembangkan dan mengadopsi teknologi efisiensi energi yang lebih inovatif. Pengurangan pajak dan kredit pajak membantu individu dan perusahaan menghemat biaya investasi dalam teknologi efisiensi energi. Dengan mendorong penggunaan teknologi efisiensi energi, insentif pajak juga membantu mengurangi emisi gas rumah kaca dan polusi udara. Pengurangan pajak penghasilan untuk individu atau perusahaan yang menggunakan teknologi efisiensi energi, seperti penggunaan lampu LED atau sistem energi terbarukan. Pemerintah Amerika Serikat memberikan kredit pajak hingga 30% dari biaya pembelian dan instalasi panel surya atau turbin angin. Uni Eropa menghapuskan bea impor untuk produk-produk teknologi efisiensi energi yang diimpor, seperti lampu LED dan panel surya.

Pemerintah memiliki peran penting dalam memberikan insentif pajak untuk mendorong penggunaan teknologi efisiensi energi. Dengan memberikan insentif pajak, pemerintah dapat menciptakan lingkungan yang kondusif bagi pengembangan dan adopsi teknologi efisiensi energi. Meningkatkan Investasi dalam Teknologi Efisiensi Energi: Insentif pajak mendorong individu, perusahaan, dan industri untuk menginvestasikan dana mereka dalam teknologi efisiensi energi. Dengan mendorong penggunaan teknologi efisiensi energi, insentif pajak membantu mengurangi konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca.

Peningkatan investasi dalam teknologi efisiensi energi juga dapat meningkatkan pertumbuhan ekonomi dan menciptakan lapangan kerja baru di sektor energi terbarukan. Insentif pajak merupakan salah satu instrumen

penting yang digunakan oleh pemerintah untuk mendorong penggunaan teknologi efisiensi energi. Dengan memberikan insentif pajak yang tepat, pemerintah dapat mempercepat transisi menuju sistem energi yang lebih bersih, lebih efisien, dan berkelanjutan.

8. Program penggantian peralatan listrik konvensional dengan yang hemat energi

Program penggantian peralatan listrik konvensional dengan peralatan hemat energi adalah salah satu strategi yang digunakan oleh pemerintah untuk meningkatkan efisiensi penggunaan energi listrik. Melalui program ini, pemerintah memberikan insentif kepada masyarakat untuk mengganti peralatan listrik konvensional dengan peralatan yang lebih efisien energi. Tujuan utama dari program ini adalah untuk meningkatkan efisiensi penggunaan energi listrik dengan mengganti peralatan listrik konvensional yang boros energi dengan peralatan yang lebih hemat energi. Dengan mengganti peralatan listrik konvensional dengan peralatan hemat energi, program ini bertujuan untuk mengurangi konsumsi energi listrik secara keseluruhan. Penggantian lampu pijar konvensional dengan lampu LED yang lebih hemat energi. Penggantian air conditioner (AC) konvensional dengan AC yang lebih efisien energi. Penggantian kulkas dan freezer yang konvensional dengan model yang lebih hemat energi. Mengganti mesin cuci konvensional dengan mesin cuci yang lebih efisien energi. Penggantian pemanas air konvensional dengan pemanas air tenaga surya atau model yang lebih efisien energi.

Pemerintah memberikan diskon harga atau subsidi kepada konsumen yang membeli peralatan listrik hemat energi. Pemerintah memberikan keringanan pajak atau pengurangan bea impor untuk peralatan listrik hemat energi. Pemerintah memberikan kredit pajak kepada konsumen yang mengganti peralatan listrik konvensional dengan peralatan hemat energi.

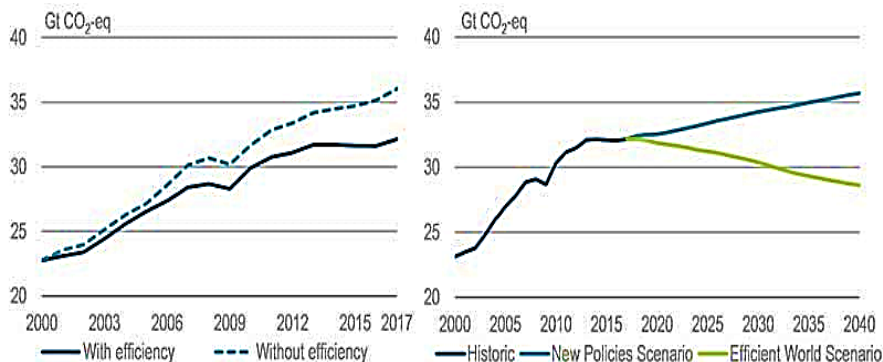
Program ini membantu mengurangi konsumsi energi listrik secara keseluruhan, mengurangi biaya operasional, dan mengurangi dampak lingkungan. Dengan mengganti peralatan listrik konvensional dengan peralatan hemat energi, efisiensi penggunaan energi listrik dapat ditingkatkan. Penggunaan peralatan listrik hemat energi membantu mengurangi emisi gas rumah kaca dan polusi udara. Pemerintah Amerika Serikat memberikan insentif berupa pengembalian sebagian pembayaran kepada konsumen yang mengganti lampu pijar konvensional dengan lampu LED. Pemerintah Indonesia memberikan insentif berupa cashback kepada konsumen yang mengganti AC konvensional dengan AC yang lebih efisien energi. Pemerintah bertanggung jawab untuk merumuskan kebijakan dan program yang mendukung penggunaan peralatan listrik hemat energi. Pemerintah juga bertanggung jawab untuk melaksanakan program penggantian peralatan listrik konvensional dengan peralatan hemat energi secara efektif dan efisien. Program penggantian peralatan listrik konvensional dengan peralatan hemat energi merupakan salah satu cara yang efektif untuk meningkatkan efisiensi penggunaan energi listrik, mengurangi biaya operasional, dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Dengan adanya insentif dari pemerintah, diharapkan masyarakat dapat lebih termotivasi untuk mengadopsi peralatan listrik yang lebih efisien energi.

Efisiensi emisi karbon adalah kunci dalam pembangunan berkelanjutan seperti energi terbarukan dan nuklir. Untuk mencapai emisi nol karbon, semua faktor tersebut harus diaktifkan. Efisiensi emisi karbon memiliki beberapa keunggulan dibandingkan faktor lainnya. Energi terbarukan merupakan sumber daya yang tidak ada habisnya, namun tidak sepenuhnya tersedia di semua tempat (tergantung situasi geografis) dan penyimpanan energi tersebut masih harus dikembangkan. Semua praktik terbaik tersebut telah dipilih di antara praktik-praktik yang berbeda karena merupakan pengalaman yang berhasil diuji,

direproduksi, dan penghematan CO₂ yang penting telah dikonfirmasi.

Efisiensi energi memberikan sejumlah manfaat lingkungan. Hal ini terutama mengurangi emisi gas rumah kaca, baik emisi langsung dari pembakaran atau konsumsi bahan bakar fosil, maupun pengurangan emisi tidak langsung dari pembangkitan listrik.

Emisi gas rumah kaca terkait energi meningkat sebesar 1,4% menjadi lebih dari 32,5 gigaton setara CO₂ (Gt CO₂-eq) pada tahun 2017 – peningkatan pertama sejak tahun 2014, setelah pertumbuhan ekonomi global yang kuat menyebabkan penggunaan bahan bakar yang lebih banyak menghasilkan emisi. Pada saat yang sama, efisiensi turut menghambat pertumbuhan emisi saat ini, jika efisiensi tidak ditingkatkan sejak tahun 2000, emisi akan mencapai hampir 4 Gt CO₂-eq, atau 12%, lebih tinggi pada tahun 2017. Berdasarkan pemodelan yang dikembangkan sebagai bagian dari efisiensi energi 2018, jika dunia menerapkan semua langkah efisiensi energi yang hemat biaya, berdasarkan teknologi yang ada, hal ini akan mencapai puncak emisi gas rumah kaca terkait energi sebelum tahun 2020 dan pada tahun 2040. Menurut proyeksi ini, yang dirinci dalam Efficient World Scenario (EWS), efisiensi energi dapat menghasilkan pengurangan emisi tahunan terkait energi sebesar 3,5 Gt CO₂-eq (12%) dibandingkan dengan tingkat emisi tahun 2017, sehingga menghasilkan lebih dari 40% pengurangan yang diperlukan. agar sejalan dengan Perjanjian Paris. Dikombinasikan dengan energi terbarukan dan langkah-langkah lainnya, efisiensi energi sangat diperlukan untuk mencapai target iklim global. Emisi gas rumah kaca terkait energi, dengan dan tanpa efisiensi, 2000-2017 (kiri) dan di NPS dan EWS, 2000-2040 (kanan)

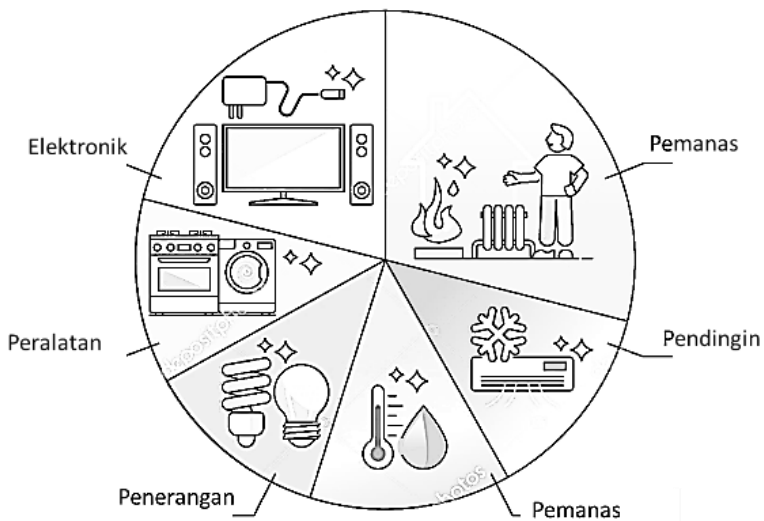


Gambar 3.3. Grafik Efficient World Scenario (EWS)

Sumber: International Energy Agency (IEA)

3.4 Prinsip efisiensi energi

Konsumsi energi merupakan elemen penting dalam pembangunan. Hal ini diilustrasikan pada gambar bawah ini yang merupakan plot konsumsi energi komersial terhadap Produk Domestik Bruto (PDB) per kapita dan menunjukkan dengan jelas konsumsi energi yang lebih tinggi berkorelasi dengan PDB per kapita yang lebih tinggi. Meskipun peningkatan penggunaan energi jelas memberikan banyak manfaat, kita juga semakin sadar akan dampak negatif penggunaan energi. Kita mengalami dampak-dampak negatif ini secara global dan lokal dalam bentuk perubahan iklim dan degradasi lingkungan lokal dalam hal misalnya kualitas udara yang buruk, degradasi tanah dalam kasus-kasus ekstrim yang menyebabkan penggurunan, penipisan sumber daya misalnya air dan polusi suara. Namun, penggunaan energi yang lebih efisien di seluruh tahap rantai pasokan atau permintaan dapat mengurangi dampak negatif konsumsi energi, namun tetap memungkinkan terjadinya pembangunan ekonomi yang sama. Selain itu, penggunaan energi yang tidak efisien umumnya mengakibatkan biaya operasional yang lebih tinggi.



Gambar 3.4. Elemen Konsumsi Energi Listrik

Di tingkat perusahaan, efisiensi energi yang lebih tinggi akan mengurangi biaya operasional dan meningkatkan profitabilitas. Di tingkat nasional, peningkatan efisiensi energi berarti berkurangnya impor energi, sehingga mengurangi tekanan devisa serta meningkatkan ketersediaan sumber daya energi yang langka untuk dimanfaatkan oleh pihak lain, sehingga memungkinkan peningkatan kegiatan-kegiatan yang bergantung pada energi untuk berkontribusi terhadap kesejahteraan ekonomi masyarakat. populasi secara keseluruhan. Masyarakat secara keseluruhan juga mendapat manfaat dari peningkatan efisiensi energi, terutama melalui berkurangnya dampak buruk penggunaan energi terhadap lingkungan. Efisiensi energi memiliki berbagai manfaat yang signifikan, baik bagi individu, masyarakat, maupun lingkungan secara keseluruhan.

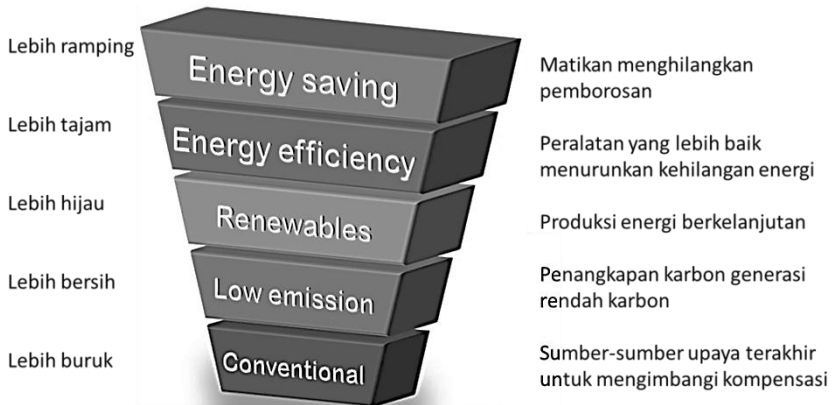
Penghematan biaya salah satu manfaat paling langsung dari efisiensi energi adalah penghematan biaya. Dengan menggunakan energi secara lebih efisien, kita mengurangi penggunaan energi dan akibatnya mengurangi tagihan listrik, gas, atau bahan bakar. Hal ini menguntungkan individu, bisnis, dan bahkan pemerintah yang dapat mengalokasikan dana yang

tadinya digunakan untuk pembayaran tagihan energi untuk keperluan lainnya. Efisiensi energi membantu melindungi lingkungan dengan mengurangi emisi gas rumah kaca dan polutan udara yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil. Ini membantu dalam mengurangi dampak perubahan iklim, polusi udara, dan kerusakan lingkungan lainnya, sehingga mempertahankan ekosistem yang sehat bagi keberlangsungan hidup makhluk hidup. Dengan mengurangi ketergantungan pada sumber daya energi yang tidak terbarukan seperti minyak bumi dan batu bara, efisiensi energi membantu meningkatkan kemandirian energi suatu negara. Ini memperkuat keamanan energi dan mengurangi risiko terhadap fluktuasi harga bahan bakar atau ketidakstabilan pasokan energi. Upaya untuk meningkatkan efisiensi energi mendorong inovasi dalam pengembangan teknologi yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Ini menciptakan peluang baru untuk industri energi terbarukan, teknologi hemat energi, dan model bisnis berkelanjutan. Dengan demikian, efisiensi energi dapat merangsang pertumbuhan ekonomi dan menciptakan lapangan kerja baru dalam sektor-sektor terkait.

Efisiensi energi dapat meningkatkan kualitas hidup dengan menciptakan lingkungan yang lebih bersih dan sehat untuk hidup. Pengurangan polusi udara dapat mengurangi risiko penyakit pernapasan dan penyakit terkait pencemaran udara lainnya, sementara penghematan biaya energi dapat meningkatkan akses terhadap layanan energi yang terjangkau bagi masyarakat yang kurang mampu.

Prioritas tertinggi mencakup pencegahan penggunaan energi yang tidak perlu melalui penghapusan limbah dan peningkatan efisiensi energi. Produksi sumber daya energi yang berkelanjutan adalah prioritas berikutnya. Pilihan pembangkitan energi yang menghabiskan banyak energi dan menghasilkan limbah merupakan prioritas terendah. Agar sistem energi dapat berkelanjutan, sumber daya yang digunakan untuk memproduksi energi harus mampu bertahan tanpa batas waktu, konversi energi tidak boleh menghasilkan produk sampingan yang berbahaya, termasuk emisi bersih, atau limbah

yang tidak dapat didaur ulang sepenuhnya; dan harus mampu memenuhi kebutuhan energi yang wajar.



Gambar 3.5. Hierarki Energi

Sumber: https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_hierarchy

Dengan hal-hal positif tersebut, dan dengan kerusakan lingkungan saat ini, meningkatkan investasi ke dalam efisiensi energi akan menjadi sesuatu yang dapat disepakati oleh semua orang. Mungkin dengan meningkatkan kesadaran akan skala dan jangkauan manfaat dari efisiensi energi, kita bisa bergerak dan mulai bekerja menyelamatkan planet ini, dan menjadi lebih baik kedepannya. Dengan demikian, efisiensi energi bukan hanya tentang penghematan biaya atau pengurangan emisi, tetapi juga tentang menciptakan masyarakat yang lebih berkelanjutan, sehat, dan sejahtera.

3.5 Efisiensi energi

Efisiensi energi dipahami sebagai pemanfaatan energi dengan cara yang paling hemat biaya untuk melaksanakan proses manufaktur atau menyediakan layanan, sehingga limbah energi diminimalkan dan konsumsi sumber daya energi primer secara keseluruhan berkurang. Dengan kata lain, praktik atau sistem hemat energi akan berupaya menggunakan lebih sedikit energi saat melakukan aktivitas yang bergantung pada energi pada saat yang

sama, dampak (negatif) konsumsi energi terhadap lingkungan dapat diminimalkan.

Berbagai cara untuk mendefinisikan efisiensi energi dibahas di bawah pada Tabel dibawah. Dapat dipahami bahwa efisiensi energi merupakan istilah yang luas dan terdapat berbagai cara untuk menggunakannya di dunia nyata. Definisi spesifiknya bergantung pada konteks dan apa pun cara penggunaannya definisi tersebut mewakili rasio keluaran terhadap masukan energi (atau tentu saja kebalikannya, masukan energi per keluaran yang ditentukan).

Tabel 3.1. Sektor efisiensi energi

Sektor Pemanfaatan Energi	Aktifitas Efisiensi Energi
Transportasi	Membuat mobil dari bahan ringan dan lebih kuat Meningkatkan efisiensi bahan bakar mobil Membeli atau mengendarai mobil yang lebih ringan
Tempat tinggal	Gunakan lampu LED jika tersedia, atau lampu Compact Fluorescent Lamp (CFL) ganti lampu pijar atau merkuri Ganti peralatan lama dengan dengan model baru yang lebih efisien Beri penyekat di dinding rumah Membuat pintu dan jendela yang tertutup rapat.
Industri	Penggunaan berulang pada bahan Perancangan desain sistem dan peralatan agar lebih efisien
Komersial (bisnis mall dan lain sebagainya)	Gunakan lampu LED atau yang lebih Hemat Energi

Efisiensi energi adalah istilah yang digunakan dalam berbagai cara, bergantung pada konteks dan mungkin orang yang menggunakan istilah tersebut. Penggunaan teknologi yang ketat menghubungkan keluaran energi dengan masukan energi, dan biasanya digunakan oleh para insinyur untuk mesin dan peralatan. Jadi, efisiensi energi motor listrik adalah rasio keluaran mekanis (yaitu usaha yang dilakukan menggunakan motor) terhadap masukan listrik. Besaran harus dinyatakan dalam satuan yang sama, misalnya kilowatt jam per hari, dan hasilnya angka tak berdimensi biasanya dinyatakan dalam persentase. Pendekatan ini digunakan secara luas di pabrik-pabrik industri dan bangunan untuk berbagai peralatan termasuk motor, pompa, kompresor, tungku dan boiler. Untuk boiler, misalnya, efisiensinya bisa dikatakan 85 persen, artinya 85 persen nilai energi bahan bakar telah diubah menjadi uap yang berguna.

Bagi banyak proses manufaktur dan aktivitas lain yang bergantung pada energi seperti pengoperasian kendaraan penumpang dan barang, membandingkan input dan output dalam satuan yang sama untuk mendapatkan bilangan tak berdimensi bukanlah pendekatan praktis. Oleh karena itu, definisi “teknis” jarang digunakan dalam berbagai jenis analisis efisiensi energi. Dalam banyak situasi nyata, efisiensi energi paling sering dinyatakan sebagai pengganti, yaitu rasio masukan energi terhadap “keluaran” dari suatu aktivitas tertentu. Jadi dalam industri, efisiensi energi tanur semen dapat dinyatakan sebagai X ribu liter bahan bakar minyak yang dibakar per ton komponen utama dalam pembuatan semen (klinker) yang diproduksi, dan efisiensi energi pabrik penggilingan sebagai Y ton batubara standar per ton tulangan baja yang diproduksi. Untuk sektor transportasi, efisiensi energi truk dapat dinyatakan sebagai Z liter minyak solar per ton-km angkutan barang, dan bus kota sebagai pencapaian W liter bensin per seribu penumpang km. Indikator seperti ini sering disebut “konsumsi energi spesifik” dan banyak digunakan untuk membandingkan efisiensi energi di seluruh pabrik, gedung, kendaraan dan moda transportasi.

Untuk memantau efisiensi energi dari waktu ke waktu, kita perlu menghubungkan konsumsi energi dengan tingkat aktivitas atau keluaran tertentu. Indikator yang digunakan untuk menyatakan efisiensi energi bukanlah persentase namun mempunyai satuan tertentu, dan perubahan yang diamati dari satu periode waktu ke periode waktu lainnya akan menunjukkan apakah aktivitas tersebut dilakukan dengan lebih atau kurang efisien faktor-faktor lain tidak berubah (misalnya, tidak ada perubahan dalam efisiensi energi). proses manufaktur, tidak ada peralihan bahan bakar, kondisi cuaca serupa, dll.)

Di tingkat nasional, istilah “efisiensi energi” jarang digunakan. Sebaliknya, “intensitas energi” biasanya diadopsi. Intensitas energi adalah rasio konsumsi energi terhadap ukuran permintaan aktivitas terkait energi, dan dapat diterapkan pada seluruh sektor perekonomian. Contohnya adalah intensitas energi sektor industri suatu negara, yang dinyatakan dalam X joule per unit Produk Domestik Bruto (PDB) yang dihasilkan oleh sektor itu. Terkadang intensitas energi dinyatakan seluruhnya dalam bentuk moneter, misalnya pengeluaran energi sebesar Z dolar per dolar PDB. Oleh karena itu, intensitas energi yang dalam banyak hal mirip dengan konsep efisiensi energi yang diilustrasikan untuk proses atau transportasi biasanya mencakup komponen struktural dan perilaku. Perubahan di sektor ini seperti perubahan jenis produk yang diproduksi, akan berdampak pada intensitas energi, terlepas dari perubahan efisiensi energi pada pabrik, proses, dan mesin yang terlibat.

3.6 Siapa yang harus peduli dengan efisiensi energi?

Dampak penggunaan energi berdampak pada kita semua dan oleh karena itu, kita semua harus memikirkan cara menggunakan energi secara lebih efisien. Namun, badan utama yang bertanggung jawab untuk mendefinisikan pendekatan nasional terhadap efisiensi energi biasanya adalah lembaga pemerintah, yang tanggung jawabnya biasanya mencakup:

1. Menetapkan undang-undang yang berkaitan dengan efisiensi energi jika diperlukan, termasuk mendefinisikan

- menerapkan peran pengawasan bagi regulator energi, jika relevan.
2. Memutuskan anggaran negara untuk mempromosikan dan melaksanakan kegiatan dan program efisiensi energi bagi masyarakat umum, termasuk pajak atau insentif lainnya bila diperlukan.
 3. Mempromosikan kesadaran energi dan menyebarkan informasi berguna mengenai langkah-langkah efisiensi energi dan prosedur yang direkomendasikan untuk semua sektor ekonomi.
 4. Mengalokasikan anggaran dan melaksanakan program efisiensi energi yang berkaitan dengan aset milik pemerintah, misalnya gedung pemerintah, armada kendaraan.

Tindakan-tindakan ini akan menjadi contoh praktik baik yang dapat diikuti oleh pihak lain. Pemerintah biasanya mengambil peran utama dalam mendorong efisiensi energi karena peran energi yang beragam dan penting dalam perekonomian nasional, dan karena pemerintah sering kali mempunyai tanggung jawab besar dalam perencanaan energi jangka panjang untuk memenuhi kebutuhan masyarakat secara keseluruhan. Pemerintah juga sedang dalam keadaan khusus posisi untuk mengatasi banyak hambatan terhadap efisiensi energi yang lebih tinggi, termasuk hambatan utama yang disebabkan oleh kurangnya informasi yang dapat diandalkan dan tepat waktu untuk semua sektor.

Di sebagian besar negara, lembaga utama yang terlibat adalah Kementerian Energi, dan lembaga serta kementerian lain juga terlibat dalam bidang penyediaan dan konsumsi energi tertentu (misalnya lembaga seperti Kementerian Energi dan Pertambangan, Kementerian Perindustrian, Kementerian Pekerjaan Umum dan Konstruksi, Kementerian Utilitas Umum dan Kementerian Keuangan, tergantung pada struktur pemerintahan di masing-masing negara).

Di beberapa negara, terdapat regulator yang mengawasi operasi perusahaan minyak, gas, listrik dan air, baik di sektor swasta maupun publik. Para regulator ini mempunyai tanggung

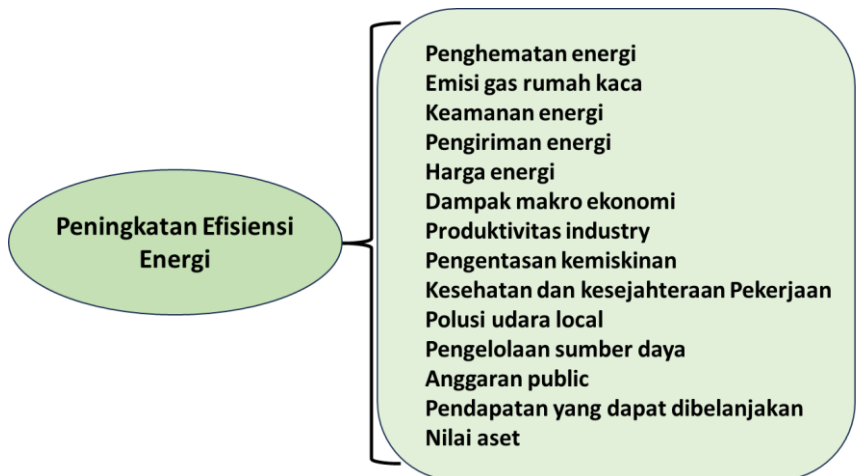
jawab untuk mengamati efisiensi kegiatan pasokan dan mempertimbangkan efisiensi dalam penetapan harga dan tarif energi.

Organisasi lain yang memiliki kepentingan kuat dalam peningkatan efisiensi energi dikenal sebagai “pemangku kepentingan”. Meskipun hal ini dapat mencakup seluruh populasi, pemangku kepentingan utama biasanya mencakup perusahaan industri, asosiasi industri, perusahaan transportasi, pemilik bangunan komersial besar dan lainnya (misalnya sekolah, rumah sakit), organisasi keuangan, produsen peralatan, gas dan listrik. perusahaan utilitas, dan perusahaan pemasok bahan bakar. Banyak di antara mereka yang menjadi konsumen energi yang mempunyai insentif langsung untuk meningkatkan efisiensi energi dan meningkatkan keuntungan dengan memangkas biaya energi. Oleh karena itu, meskipun pemerintah mempunyai peran dalam menciptakan “lingkungan” yang tepat untuk mendorong efisiensi energi, pada umumnya inisiatif untuk melakukan tindakan efisiensi energi akan diambil oleh perusahaan swasta dan individu. Mungkin juga ada beberapa lembaga pemerintah yang bertanggung jawab atas kegiatan yang memakan energi, misalnya mengoperasikan gedung-gedung pemerintah, mengelola sekolah dan universitas, membangun dan mengoperasikan rumah sakit. Badan-badan ini harus melaksanakan sendiri kegiatan dan investasi efisiensi energi (mungkin dengan bantuan subkontraktor sektor swasta). Namun pada dasarnya, peningkatan efisiensi energi di sebagian besar perekonomian sering kali dapat dicapai melalui upaya perusahaan yang berkepentingan untuk meningkatkan keuntungan mereka.

Sampai batas tertentu, hal ini berlaku pada sektor domestik, dimana peralatan dengan efisiensi yang lebih tinggi biasanya akan dipromosikan oleh produsen dan agen mereka serta importir. Namun demikian, individu juga mempunyai tanggung jawab untuk memastikan bahwa mereka mengoperasikan dan memelihara peralatan rumah tangga dengan benar, dan bahwa mereka sadar akan pemborosan energi di rumah yang disebabkan oleh “kekurangan” perilaku, misalnya lupa mematikan lampu saat tidak diperlukan, dan juga

menyetel termostat. rendah di ruangan ber-AC (atau terlalu tinggi di gedung berpemanas).

Berbagai manfaat peningkatan efisiensi energi akan memiliki dampak sebagai berikut



Gambar 3.6. Manfaat peningkatan efisiensi energi

Modul ini menjelaskan serangkaian pendekatan efisiensi energi (termasuk tindakan manajemen dan teknologi) dan manfaat terkait untuk memungkinkan para pemangku kepentingan utama memahami dan menerapkan program efisiensi energi yang lebih efektif dalam wilayah tanggung jawab mereka masing-masing.

3.7 Manfaat Peningkatan Efisiensi Energi

Ada banyak manfaat dari peningkatan efisiensi energi. Hal ini secara umum dapat dikategorikan menjadi manfaat finansial/ekonomi, lingkungan hidup dan sosial. Arti penting masing-masing manfaat ini bergantung pada situasi aktual di negara atau wilayah tertentu, termasuk misalnya harga berbagai jenis energi, biaya tindakan dan peralatan efisiensi energi, rezim perpajakan, dan tingkat efisiensi energi saat ini. sudah tercapai.

Bagi perusahaan swasta, manfaat terpenting dari efisiensi energi yang lebih tinggi akan dikaitkan dengan manfaat finansial dari biaya yang lebih rendah untuk menjalankan bisnis. Hal ini berlaku untuk perusahaan manufaktur pada umumnya serta

pemasok energi seperti pembangkit listrik dan kilang minyak. Contohnya adalah:

1. Perusahaan yang hemat energi dapat memperoleh keunggulan kompetitif dibandingkan perusahaan yang kurang efisien, sehingga memungkinkan mereka meningkatkan keuntungan dengan harga produk saat ini, atau menurunkan harga untuk memperoleh pangsa pasar, atau kombinasi dari hal-hal tersebut.
2. Regulator utilitas mungkin mengharuskan pemasok utilitas untuk menurunkan harga bagi konsumen, dengan manfaat efisiensi operasi yang lebih tinggi dibagi antara produsen energi dan konsumen untuk keuntungan bersama (dan untuk manfaat masyarakat secara keseluruhan).
3. Mengurangi dampak lingkungan juga dapat menjadi alat pemasaran yang signifikan bagi perusahaan yang efisien, karena persepsi masyarakat terhadap perusahaan “hijau” semakin berperan dalam keputusan pembelian. Manfaat lingkungan mencakup banyak elemen, seperti berkurangnya polusi lokal melalui penggunaan bahan bakar yang lebih sedikit, emisi gas rumah kaca yang lebih rendah, penggunaan kayu bakar yang lebih sedikit, sehingga kerusakan hutan pun berkurang.
4. Bahkan ketika output perusahaan ditingkatkan (misalnya melalui peningkatan kapasitas manufaktur), peningkatan efisiensi energi dalam banyak kasus dapat memberikan kontribusi yang signifikan dalam mengurangi dampak negatif konsumsi energi per unit output. Dengan demikian, peningkatan emisi polutan apa pun akan diminimalkan.

Pada tingkat nasional, manfaat seperti ini dapat mengurangi ketergantungan suatu negara terhadap impor energi, atau dapat memperpanjang umur cadangan energi jika ada. Hal ini merupakan kontribusi yang berharga bagi perekonomian nasional, yang sering kali dapat dicapai dengan biaya yang tidak terlalu besar bagi perusahaan yang terlibat, dan sedikit atau tanpa biaya bagi pemerintah sendiri.

3.8 Manfaat efisiensi energi bagi dunia usaha

Di sebagian besar bisnis, tahap awal peningkatan efisiensi energi dapat dicapai melalui sedikit atau tanpa investasi modal. Perawatan yang benar dan tepat waktu dapat memberikan dampak besar pada peningkatan efisiensi energi (misalnya mengganti insulasi yang rusak atau tidak memadai pada pipa panas atau dingin). Boiler dan tungku biasanya dapat dioperasikan secara lebih efisien dengan memastikan kondisi pembakaran yang tepat selalu terjaga. Di beberapa pabrik atau gedung, operator boiler/tungku mungkin tidak memiliki keterampilan yang diperlukan (dan instrumen pengujian yang tepat) untuk mengetahui bagaimana hal ini dapat dicapai. Namun, program pelatihan dan pemasangan beberapa perangkat sederhana berbiaya rendah biasanya dapat membuahkan hasil dalam waktu beberapa minggu.

Bola lampu berefisiensi tinggi adalah contoh lain dari investasi sederhana yang biasanya membuahkan hasil dalam waktu sangat singkat. Tentu saja, beberapa investasi besar dalam peningkatan efisiensi energi misalnya peralatan proses baru, boiler yang benar-benar baru dapat dibenarkan secara finansial dan sering kali dapat dilakukan oleh suatu bisnis untuk menghasilkan peningkatan keuntungan yang besar. Investasi besar pada peralatan baru sering kali disertai dengan peningkatan kapasitas produksi, sehingga manfaatnya tidak hanya terbatas pada pengurangan energi. Pada saat yang sama, peralatan baru dapat memberikan lingkungan yang lebih aman dan bersih bagi para pekerja selain mencapai efisiensi energi yang lebih tinggi.

Secara keseluruhan, efisiensi energi yang lebih tinggi menghasilkan biaya operasional yang lebih rendah bagi hampir semua bisnis, sehingga memungkinkan perusahaan yang “efisien” memperoleh keunggulan kompetitif dibandingkan pesaing yang lebih boros.

Selain itu, sebagaimana disebutkan dalam teks utama, bisnis yang hemat sumber daya menunjukkan tanggung jawab terhadap lingkungan. Hal ini dapat digunakan untuk

mempromosikan bisnis sebagai bisnis yang ramah lingkungan dan dapat menjadi pemasaran yang kuat

Pesan terakhir, kita harus mencatat bahwa dunia usaha dapat didorong untuk melakukan investasi efisiensi energi melalui berbagai bentuk insentif pajak. Banyak di antaranya yang berorientasi pada peningkatan laju penyusutan untuk kategori peralatan atau proses efisien tertentu. Di beberapa negara, konsumsi energi yang lebih rendah dapat mengurangi beban pajak perusahaan

3.9 Efisiensi Energi Sesuai Dengan Bauran Energi Secara Keseluruhan

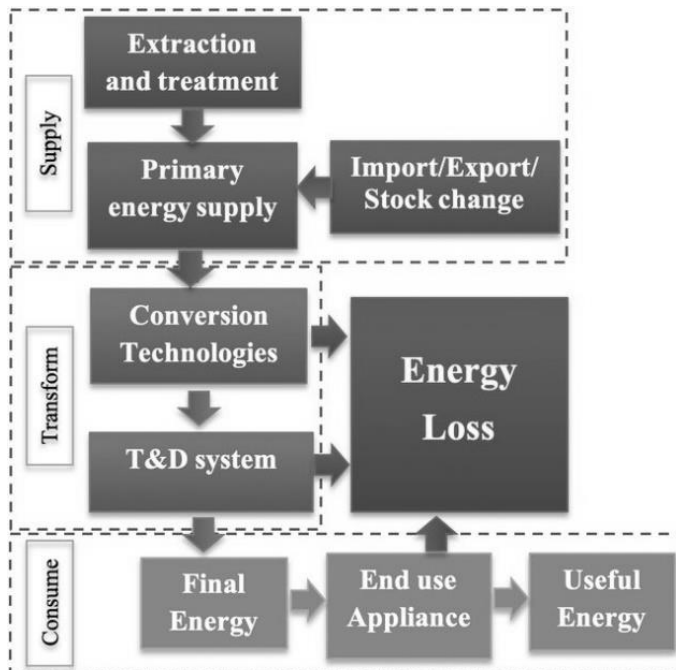
Untuk menghargai pentingnya efisiensi energi, kita harus memahami di mana efisiensi energi sesuai dengan gambaran energi secara keseluruhan dan di mana kerugian energi utama terjadi. Semua yang disebut pengguna akhir menggunakan energi untuk melakukan suatu “aktivitas”, seperti memproduksi suatu produk, mengangkut barang atau penumpang, memasak makanan atau menyediakan penerangan. Pelanggan pada umumnya tidak terlalu tertarik pada rincian bagaimana energi disediakan bagi mereka, namun mereka tertarik pada pemanfaatan energi dalam aktivitas mereka dan bagaimana mereka dapat beroperasi dengan aman dan efisien untuk menghasilkan keluaran yang dibutuhkan, dan dengan biaya rendah. atau setidaknya dapat diterima, biayanya. Tentu saja, perusahaan pemasok energi sendiri mempunyai kepentingan yang relatif luas yang mencakup aspek pasokan dan permintaan penggunaan energi.

Berdasarkan agenda Tujuan Pembangunan Berkelanjutan, efisiensi energi merupakan salah satu pendorong utama pembangunan berkelanjutan. Selain itu, efisiensi energi menawarkan manfaat ekonomi dalam jangka panjang dengan mengurangi biaya impor/pasokan bahan bakar, pembangkitan energi, dan pengurangan emisi dari sektor energi. Untuk meningkatkan efisiensi energi dan manajemen energi yang lebih optimal, analisis data real-time yang efektif dalam rantai pasokan energi memainkan peran penting. Rantai pasokan

energi, mulai dari ekstraksi sumber daya hingga penyampaian dalam bentuk yang bermanfaat bagi pengguna akhir, mencakup tiga bagian utama:

1. Pasokan energi termasuk proses pengilangan hulu;
2. Proses transformasi energi termasuk transmisi dan distribusi pembawa energi;
3. Sisi permintaan energi, yang mencakup penggunaan energi pada bangunan, sektor transportasi, dan industri

Gambar dibawah ini menunjukkan ketiga bagian ini beserta komponen-komponennya yang relevan. Dalam pembahasan ini, dibahas peran IoT di semua segmen rantai pasokan energi. Tujuannya adalah untuk menunjukkan potensi kontribusi IoT terhadap efisiensi penggunaan energi, pengurangan permintaan energi.



Gambar 3.7. Rantai pasokan permintaan energi
Sumber : Hossein Motlagh Et All

3.10 Kerugian kehilangan energi

Listrik merupakan sumber energi vital yang memainkan peran penting dalam pembangunan ekonomi dan sosial suatu negara. Namun pendistribusian tenaga listrik dari pembangkit listrik sampai ke konsumen merupakan proses kompleks yang melibatkan jaringan sistem transmisi dan distribusi tenaga listrik. Sistem ini rentan terhadap kerugian yang terjadi pada berbagai tahapan proses distribusi, seperti transmisi, konversi, dan distribusi. Kehilangan daya pada sistem distribusi dapat disebabkan oleh faktor teknis dan non teknis. Faktor teknis meliputi hambatan penghantar, jatuh tegangan, dan rugi-rugi trafo, sedangkan faktor non teknis meliputi pencurian dan kerusakan peralatan. Kerugian ini dapat mempunyai konsekuensi ekonomi yang signifikan, seperti keandalan yang lebih rendah, biaya yang lebih tinggi, dan pendapatan utilitas yang lebih rendah. Oleh karena itu, penting untuk mempelajari dan menganalisis penyebab rugi-rugi listrik pada sistem distribusi dan menyusun strategi untuk menguranginya.

Inefisiensi dapat terjadi pada setiap tahap rantai pasokan-permintaan. Misalnya, efisiensi keseluruhan pembangkit listrik konvensional walaupun dioperasikan dengan baik—seringkali hanya mencapai 30 persen, sementara boiler berbahan bakar batu bara yang dioperasikan dengan buruk mungkin kesulitan mencapai efisiensi 50 persen. Oleh karena itu, kehilangan energi dapat menjadi signifikan di seluruh rantai pasokan. Kerugian dapat dibagi menjadi dua jenis utama:

1. Kerugian intrinsik, yaitu kerugian yang tidak dapat dihindari seperti kerugian yang merupakan fungsi aktivitas dan bergantung pada hukum termodinamika dan fisika. Misalnya, jalur distribusi listrik (dan pipa uap) akan selalu mengalami rugi-rugi, meskipun ukurannya tepat (atau diisolasi dengan baik).
2. Kerugian yang dapat dihindari, yaitu kerugian akibat desain, pemeliharaan dan pengoperasian sistem yang kurang optimal/buruk (kebocoran uap, saluran yang tidak berinsulasi, ukuran kabel listrik yang tidak memadai, peralatan pembakaran yang tidak disetel dengan benar, dll.).

Kerugian yang dapat dihindari dalam rantai pasokan-permintaan akan mengakibatkan hilangnya peluang, yang memerlukan tambahan sumber daya energi primer yang harus dikonsumsi untuk mencapai keluaran yang diperlukan dari suatu kegiatan. Selain biaya tambahan, degradasi lingkungan juga akan meningkat.

Meningkatkan efisiensi energi di seluruh tahapan rantai pasokan-permintaan tentu saja merupakan cara untuk mengurangi kehilangan energi. Dalam jangka pendek, peningkatan efisiensi energi dapat mengatasi secara langsung kerugian yang dapat dihindari, namun dalam jangka panjang, kita mungkin dapat mengatasi kerugian yang “tidak dapat dihindari” sampai tingkat tertentu. Misalnya, kita mungkin dapat mendesain ulang suatu proses atau peralatan untuk memastikan kerugian yang disebabkan oleh alasan teknis dapat diminimalkan.

3.11 Aliran energi dalam perekonomian nasional

Transformasi energi dalam rantai pasokan energi untuk berbagai kegiatan yang bergantung pada energi di perekonomian nasional (dan regional) dapat diringkas dalam diagram yang disederhanakan dalam bentuk aliran energi, seperti contoh di Afrika Selatan yang ditunjukkan pada gambar IV di bawah.

Aliran energi, bersama dengan data konsumsi energi dan pemahaman tentang rantai pasokan-permintaan yang relevan untuk berbagai sektor, dapat digunakan untuk menyarankan di mana peningkatan efisiensi energi dapat memberikan dampak besar dan menunjukkan jenis energi yang dapat dihemat. Dengan informasi ini, beberapa prioritas awal dapat dikembangkan untuk program efisiensi energi di tingkat nasional.



Gambar 3.8. Ketersediaan Energi

<https://den.go.id/public/uploads/infografis/infografis4.jpg>

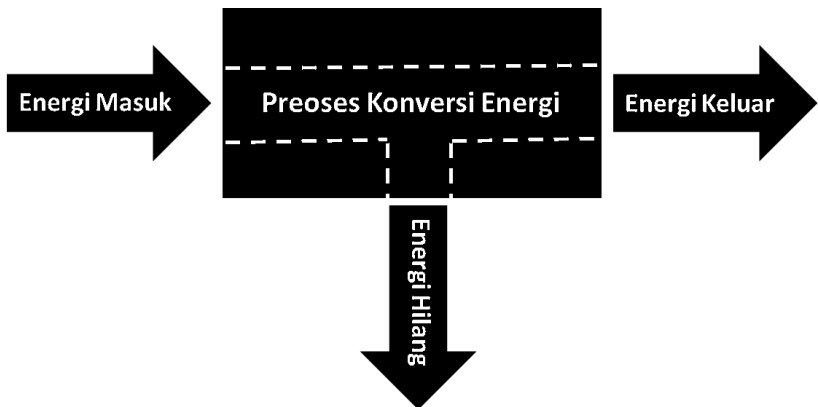
Meskipun intensitas energi sering digunakan sebagai pengganti efisiensi energi, kita dapat melihat bahwa hal ini dapat menyebabkan penarikan kesimpulan yang menyesatkan. Banyak faktor yang mempengaruhi intensitas energi secara keseluruhan bagi perekonomian nasional. Angka tersebut misalnya akan mencerminkan standar hidup suatu negara secara keseluruhan, serta iklimnya. Bukan hal yang aneh jika iklim yang sangat dingin atau panas memerlukan konsumsi energi yang lebih besar di rumah dan tempat kerja untuk pemanasan atau pendinginan. Seperti dikemukakan di atas, intensitas energi seringkali sangat dipengaruhi oleh ukuran relatif dari sektor industri, dan oleh sifat spesifik dari kegiatan industri dalam sektor tersebut.

Oleh karena itu, indikator intensitas energi akan berguna jika komponen-komponen yang mendasarinya dipahami dengan baik dan data diinterpretasikan dengan tepat. Tanpa konteks struktural, angka intensitas energi bisa menyesatkan. Konteks struktural yang

terdefinisi dengan baik dan terukur memungkinkan pembuat kebijakan pemerintah untuk memutuskan di mana perubahan kebijakan dapat dilakukan dan apa potensi dampaknya. Hal ini mencakup dampak dari langkah-langkah peningkatan efisiensi energi di seluruh perekonomian (misalnya perubahan efisiensi tungku dan boiler industri, efisiensi motor listrik, standar konstruksi untuk bangunan domestik dan komersial, penghematan bahan bakar kendaraan).

3.12 Efisiensi konversi energi

Dalam sistem energi apa pun, kita mempunyai proses konversi energi, yaitu proses perubahan satu bentuk energi ke bentuk energi lainnya. Metrik yang mengukur efisiensi konversi energi disebut efisiensi sistem.



Gambar 3.9. Konversi sistem energi

Efisiensi energi adalah perbandingan antara keluaran energi dengan masukan energi, apapun bentuknya. Ingatlah bahwa nilainya mungkin lebih kecil dari satu (misalnya pada mesin kalor), namun bisa lebih besar dari satu (misalnya pada sistem pompa kalor).

Kita dapat membedakan antara terminologi manajemen sisi permintaan dan efisiensi energi. Dalam penggunaan konvensional, DSM sering diterapkan pada manajemen beban listrik, seperti peak lopping atau load shifting saja, dan bukan pada intervensi yang lebih umum yang termasuk dalam topik

efisiensi energi sisi permintaan, yang dibahas dalam modul ini. Hal ini khususnya terjadi pada program DSM yang dilaksanakan oleh perusahaan utilitas yang berkaitan dengan pengelolaan profil beban dan permintaan daya puncak. Meskipun perusahaan penyedia listrik mungkin perlu meningkatkan faktor bebannya dan menunda perluasan kapasitas yang mahal, dalam praktiknya perusahaan utilitas cenderung tidak antusias terhadap pengalihan beban. Hal ini karena mereka memperkirakan akan terjadi penurunan permintaan listrik dan listrik, yang berdampak pada penurunan penjualan dan pendapatan.

3.13 Bauran dan Efisiensi Energi Untuk Keberlanjutan Dan Pengembangan Energi

Teknologi energi terbarukan cenderung memiliki profil yang lebih tinggi dibandingkan tindakan efisiensi energi. Hal ini terutama karena alasan yang jelas bahwa mereka lebih terlihat sebagai instalasi baru dan dianggap sebagai teknologi yang lebih “canggih”. Hal ini terjadi meskipun langkah-langkah tersebut sering kali memerlukan biaya modal awal yang lebih tinggi dibandingkan langkah-langkah efisiensi energi (dan mungkin juga memiliki biaya operasional yang kurang menguntungkan). Namun, salah satu manfaat penerapan energi terbarukan adalah peningkatan kesadaran akan produksi dan konsumsi energi di kalangan pemilik instalasi dan juga seringkali di kalangan masyarakat yang dapat melihat atau mungkin berinteraksi dengan teknologi tersebut.

Misalnya, panel surya atau panel pemanas air tenaga surya di gedung publik meningkatkan kesadaran akan penggunaan energi terbarukan di kalangan pengguna gedung dan anggota masyarakat lainnya.

Penerapan langkah-langkah efisiensi energi di semua tahap rantai pasokan atau permintaan dapat mengurangi secara signifikan dampak negatif penggunaan energi terhadap lingkungan dan kesejahteraan manusia, dan meningkatkan ketersediaan cadangan energi primer sekaligus mencapai manfaat maksimal dalam hal energi. Keluaran energi yang tersedia. Biaya bagi pemasok dan konsumen dapat dikurangi,

sekaligus mempertahankan tingkat aktivitas yang bergantung pada energi. Kita telah melihat bagaimana efisiensi keseluruhan suatu kegiatan yang bergantung pada energi, mulai dari sumber energi primer hingga keluaran akhir, merupakan angka yang mewakili dampak kumulatif dari semua inefisiensi di sepanjang rantai pasokan-permintaan. Langkah-langkah untuk meningkatkan efisiensi energi pada setiap langkah akan berkontribusi pada peningkatan angka akhir, sehingga perbaikan kecil sekalipun dapat memberikan dampak yang signifikan.

Meskipun peningkatan efisiensi energi di sisi permintaan jelas akan membawa pengurangan biaya energi langsung ke pengguna akhir energi, peningkatan efisiensi pembangkitan, transmisi dan distribusi tindakan di sisi pasokan yang dilakukan oleh perusahaan-perusahaan utilitas juga dapat membawa manfaat biaya pada akhirnya. -pengguna dalam lingkungan peraturan yang umum dengan memastikan harga energi terkendali dengan baik. Memang benar, efek gabungan dari peningkatan efisiensi energi dari sisi pasokan dan permintaan berarti bahwa beban pada fasilitas pembangkit listrik berkurang, dan hal ini dapat membantu menjaga sistem dan peralatan lama tetap dalam kondisi baik. Hal ini karena beban keseluruhan yang lebih rendah sering kali menyebabkan peralatan bekerja di bawah kapasitas maksimum atau lebih sering dimatikan (atau dalam jangka waktu lebih lama) untuk pemeliharaan preventif. Peralatan yang lebih tua biasanya memerlukan lebih banyak perawatan: tergantung pada karakteristik sistem, pematian paksa untuk perbaikan dapat dikurangi dan efisiensi pengoperasian sistem dapat ditingkatkan. Hasilnya, keandalan sistem secara keseluruhan dapat ditingkatkan.

Hambatan untuk mencapai tingkat peningkatan efisiensi energi yang baik mencakup kurangnya kebijakan atau peraturan, kurangnya informasi dan kesadaran akan manfaat potensial, kegagalan untuk menekankan pengelolaan energi yang baik, dan kurangnya kapasitas teknis untuk mengidentifikasi, mengevaluasi dan menerapkan energi. langkah-langkah efisiensi. Hambatan teknologi dan pendanaan juga terlihat

dalam beberapa situasi. Dari berbagai hambatan tersebut, kegagalan dalam menerapkan manajemen energi yang baik biasanya merupakan salah satu faktor terpenting bagi perusahaan. Memperbaiki manajemen energi hampir selalu merupakan tindakan berbiaya rendah yang memberikan manfaat berharga dalam jangka pendek.

DAFTAR PUSTAKA

- Burchi, G., & Salles, A. (2022). OR Increases Efficiency and Productivity Whilst Reducing Co2 Emissions. *Impact*, 2022(1), 23-26.
- Dandy Rizky Wibowo; Alin Halimatussadiyah, supervisor; Prani Sastiono, examiner; Napitupulu, Domdom Lydia, examiner (Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Indonesia, 2023)
- Doty, S., & Turner, W. C. (2004). Energy management handbook. CRC Press.
- FAZA, T. G., & ATMANTI, H. D. (2024). Analisis Pengaruh Inovasi Teknologi, Pertumbuhan Ekonomi, Dan Konsumsi Energi Terhadap Emisi CO₂, Studi Kasus Indonesia Periode 1980-2020 (Doctoral dissertation, UNDIP: Fakultas Ekonomika dan Bisnis).
- Hogan, W. W., & Jorgenson, D. W. (1991). Productivity trends and the cost of reducing CO₂ emissions. *The Energy Journal*, 12(1), 67-86.
- Holmberg, K., & Erdemir, A. (2019). The impact of tribology on energy use and CO₂ emission globally and in the combustion engine and electric cars. *Tribology International*, 135, 389-396.
- Hossein Motlagh, N., Mohammadrezaei, M., Hunt, J., & Zakeri, B. (2020). Internet of Things (IoT) and the energy sector. *Energies*, 13(2), 494.
- Nasional, T. S. J. D. E. (2019). Indonesia energy outlook 2019. *J. Chem. Inf. Model*, 53(9), 1689-1699.
- Sinambela, R. (2023). Maintenance Scorecard Approach And Analytical Hierarchy Process Method For Determining The Weight Of The Key Performance Indicator. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 20(4), 1-3.
- Sinambela, R., Khikmatulloh, I., Rahman, A., & Hendriyana, Y. (2022). REPAIR OF LOUDSPEAKERS AS A SUPPORT FOR WORSHIP ACTIVITIES AT THE AL-MADINAH AL-MUNAWWAROH PERUM MOSQUE. *SUNRISE GARDEN*

BUKIT PUTRA CILEUNGI WEST JAVA: PERBAIKAN PENERAS SUARA SEBAGAI PENUNJANG KEGIATAN IBADAH DI MASJID AL-MADINAH AL-MUNAWWAROH PERUM. SUNRISE GARDEN BUKIT PUTRA CILEUNGI JAWA BARAT. *Indonesian Journal of Engagement, Community Services, Empowerment and Development*, 2(3), 332-327.

- Sinambela, R., Mandang, T., Subrata, I. D. M., & Hermawan, W. (2020). Application of an inductive sensor system for identifying ripeness and forecasting harvest time of oil palm. *Scientia Horticulturae*, 265, 109231.
- Soori, M., Arezoo, B., & Dastres, R. (2023). Internet of Things untuk Pabrik Cerdas di Industri 4.0, sebuah ulasan. *Internet of Things dan Sistem Cyber-Fisik*.
- Sun, W., & Huang, C. (2022). Predictions of carbon emission intensity based on factor analysis and an improved extreme learning machine from the perspective of carbon emission efficiency. *Journal of Cleaner Production*, 338, 130414.

BAB 4

OPTIMALISASI JARINGAN DISTRIBUSI

Oleh Riyani Prima Dewi

4.1 Jaringan Distribusi Listrik

Jaringan distribusi listrik adalah infrastruktur yang menghubungkan pembangkit listrik dengan konsumen akhir, memungkinkan transfer energi listrik dari sumber ke titik pemakaian. Umumnya, Jaringan distribusi listrik diartikan sebagai serangkaian komponen dan perangkat yang bekerja bersama untuk mengirimkan energi listrik dari tempat pembangkitannya ke pengguna akhir. Sedangkan, sistem distribusi listrik mengacu pada struktur organisasi dan pengelolaan jaringan distribusi listrik secara keseluruhan yang mencakup perencanaan, desain, pembangunan, pengoperasian, pemeliharaan, dan pengendalian jaringan distribusi listrik. Sistem distribusi listrik bertujuan untuk menyediakan layanan listrik yang andal, efisien, dan terjangkau kepada konsumen.

Komponen-komponen utama dalam sistem distribusi listrik meliputi:

1. **Perencanaan:** Tahap perencanaan yang melibatkan analisis kebutuhan energi, pemilihan lokasi pembangkit, dan desain jaringan distribusi yang efisien.
2. **Pembangunan:** Proses konstruksi fisik jaringan distribusi listrik, termasuk pemasangan saluran distribusi, transformator, sakelar, dan perangkat perlindungan lainnya.
3. **Pengoperasian:** Pengelolaan dan pengendalian operasi harian jaringan distribusi listrik, termasuk pemantauan aliran listrik, penjadwalan pemeliharaan, dan penanganan gangguan jaringan.
4. **Pemeliharaan:** Kegiatan pemeliharaan rutin untuk menjaga keandalan dan kinerja optimal jaringan distribusi listrik,

termasuk pemeriksaan rutin, perbaikan, dan penggantian peralatan yang rusak.

5. **Pengendalian:** Proses pengendalian dan manajemen risiko dalam operasi jaringan distribusi listrik, termasuk penanganan gangguan, manajemen beban, dan peningkatan keandalan jaringan.

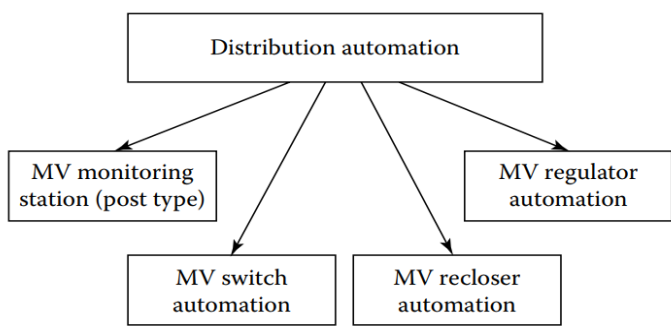
Sistem distribusi listrik berkembang seiring dengan perkembangan teknologi dan kebutuhan energi yang semakin kompleks. Inovasi dalam bidang teknologi informasi, energi terbarukan, kecerdasan buatan, dan penyimpanan energi semakin memperkaya kemampuan sistem distribusi listrik untuk memenuhi tuntutan masa depan yang lebih cerdas, efisien, dan berkelanjutan.

Tren Pengetahuan dan Teknologi dalam Jaringan Distribusi Listrik:

1. **Digitalisasi:** Perkembangan teknologi digital telah memainkan peran kunci dalam transformasi jaringan distribusi listrik modern. Konsep jaringan listrik pintar (smart grid) mengintegrasikan sensor, pemantauan real-time, dan sistem kontrol otomatis untuk meningkatkan efisiensi, keandalan, dan responsifitas jaringan.
2. **Energi Terbarukan:** Dengan meningkatnya kesadaran akan dampak lingkungan dan keterbatasan sumber daya energi konvensional, energi terbarukan seperti tenaga surya dan angin semakin menjadi fokus utama dalam pengembangan jaringan distribusi listrik. Integrasi energi terbarukan ke dalam jaringan memerlukan teknologi yang inovatif untuk mengelola fluktuasi dalam produksi energi.
3. **Penyimpanan Energi:** Teknologi penyimpanan energi semakin penting dalam menyeimbangkan pasokan dan permintaan energi dalam jaringan distribusi listrik. Sistem penyimpanan energi yang canggih, seperti baterai lithium-ion dan flywheel, memungkinkan penyimpanan energi berlebih untuk digunakan saat diperlukan.
4. **Kecerdasan Buatan (AI):** Penggunaan kecerdasan buatan dalam analisis data jaringan distribusi listrik memungkinkan prediksi yang lebih akurat tentang permintaan energi, deteksi gangguan jaringan, dan optimasi operasi jaringan secara keseluruhan.

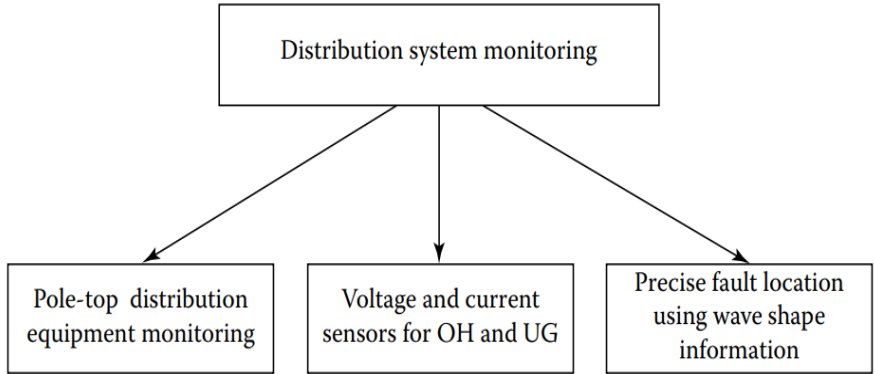
4.2 Optimalisasi Sistem Distribusi

Dalam aplikasi DA pada umumnya, tugas-tugas yang disertakan ditunjukkan pada Gambar 4.1, yang mencakup otomatisasi pengatur tegangan menengah (MV), stasiun pemantauan tipe pasca MV, otomatisasi sakelar MV, dan otomatisasi recloser MV. Namun, dalam pengembangan jaringan pintar, mungkin ada tugas tambahan yang dapat diotomatisasi pada tingkat distribusi. Misalnya, definisi IEEE tentang DA adalah “sebuah sistem yang memungkinkan perusahaan utilitas listrik memantau, mengoordinasikan, dan mengoperasikan perusahaan distribusi dari jarak jauh dalam mode *real-time* dari lokasi terpencil.”

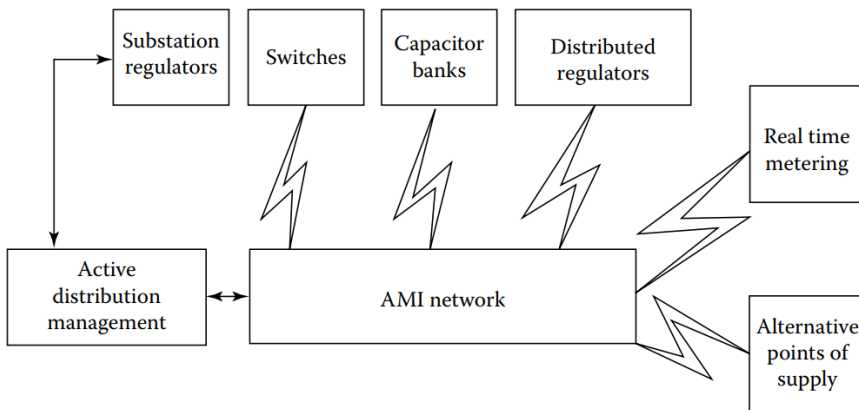


Gambar 4.1. Otomatisasi Pengatur Tegangan Menengah (MV)

Otomatisasi tersebut juga mencakup monitoring atau pemantauan sistem distribusi dan AMI. Gambar 5.2 menunjukkan tugas-tugas yang terlibat dalam monitoring sistem distribusi.



Gambar 4.2. Tugas-tugas dalam monitoring sistem distribusi



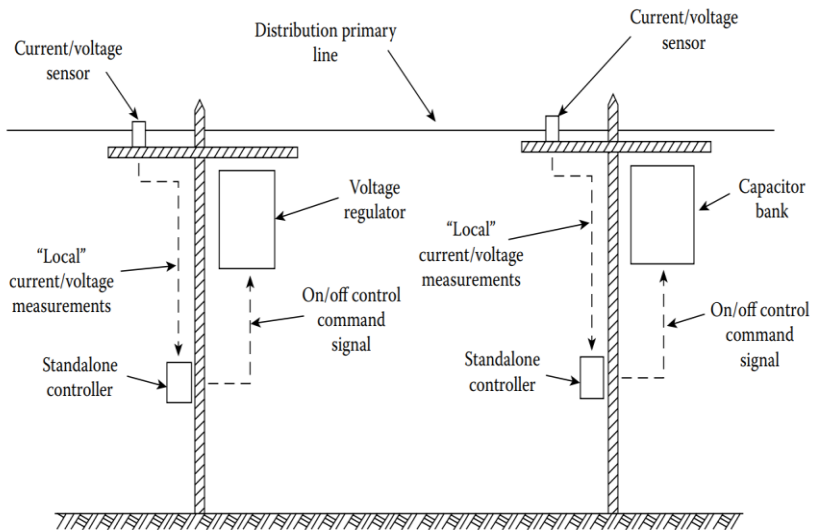
Gambar 4.3. Tugas-tugas AMI

Gambar 4.3 menunjukkan tugas AMI. Gambar tersebut mengilustrasikan hubungan antara jaringan komunikasi yang disebut AMI dan komponen gardu induk (yaitu regulator gardu induk, saklar, bank kapasitor, regulator terdistribusi, meteran real-time, titik pasokan alternatif, serta jaringan aktif (jika mereka ada) yang harus ditetapkan.

Berbagai aplikasi sistem manajemen distribusi (SIM) yang umum digunakan saat ini antara lain sebagai berikut:

1. *Fault detection, isolation, and service restoration (FDIR)*: Dirancang untuk meningkatkan keandalan sistem. Teknologi ini mendeteksi kesalahan pada bagian *feeder* berdasarkan pengukuran jarak jauh dari unit terminal *feeder* (FTU), dengan cepat mengisolasi bagian *feeder* yang mengalami gangguan, dan kemudian memulihkan layanan ke bagian *feeder* yang tidak mengalami gangguan.
2. *Prosesor topologi (TP)*: Ini adalah prosesor offline yang secara akurat menentukan topologi jaringan distribusi dan konektivitas untuk pewarnaan tampilan dan untuk menyediakan data jaringan yang akurat untuk aplikasi kontrol DMS lainnya.
3. *Optimal network reconfiguration (ONR)*: Merupakan modul yang merekomendasikan operasi peralihan untuk mengkonfigurasi ulang jaringan distribusi guna meminimalkan kehilangan energi jaringan, menjaga profil

- tegangan optimal, dan menyeimbangkan kondisi pembebanan antara trafo gardu induk, penyulang distribusi, dan urutan fasa dalam jaringan.
4. IVVC: Memiliki tiga tujuan dasar mengurangi kerugian jaringan feeder dengan memberi energi atau menghilangkan energi pada kapasitor bank *feeder*, memastikan bahwa profil tegangan optimal dipertahankan di sepanjang *feeder* selama kondisi operasi normal, dan mengurangi beban puncak melalui pengurangan tegangan *feeder* sebesar mengendalikan posisi tap trafo pada gardu induk dan pengatur tegangan pada bagian penyulang, seperti digambarkan pada Gambar 4.4.
 5. *Switch order management* (SOM): Sangat berguna bagi operator sistem dalam operasi *real-time*. SOM menyediakan fitur analisis dan eksekusi tingkat lanjut untuk mengelola semua operasi switch dalam sistem dengan lebih baik.



Gambar 4.4. Ilustrasi tentang cara mengontrol aliran volt/var yang terkait dengan saluran distribusi primer menggunakan peralatan pengatur volt/var yang berdiri sendiri dan independen berdasarkan pendekatan VVC tradisional

6. Pemodelan beban dinamis/estimasi beban (LM/LE): LM/LE adalah modul dasar di DMS. Modul ini menggunakan semua informasi yang tersedia dari jaringan distribusi untuk secara akurat memperkirakan beban individual dan beban *Aggregate*.
7. Simulator pelatihan operator (DTS): Digunakan untuk mensimulasikan efek kondisi operasi normal dan abnormal serta skenario peralihan sebelum diterapkan ke sistem nyata.
8. Analisis hubung singkat (SCA): Digunakan untuk menghitung arus hubung singkat untuk mengevaluasi kemungkinan dampak gangguan pada jaringan.
9. Koordinasi proteksi relai (RPC): Mengelola dan memverifikasi pengaturan relai pengumpan distribusi dalam berbagai kondisi pengoperasian dan konfigurasi jaringan.
10. Penempatan kapasitor optimal/penempatan pengatur tegangan optimal (OCP/OVP): Digunakan untuk menentukan lokasi optimal untuk bank kapasitor dan pengatur tegangan di jaringan distribusi untuk pengendalian profil volt/var pengumpan yang paling efektif.

4.2.1 Jaringan Distribusi Aktif

Jaringan aktif adalah jaringan pasif yang telah diubah menjadi jaringan aktif melalui koneksi *Distributed Generation* (DG), misalnya *Combined Heat and Power* (CHP) dan/atau unit penghasil energi berbasis terbarukan lainnya seperti turbin angin atau panel surya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.5. Sehingga, Jaringan distribusi aktif adalah jaringan distribusi yang terkoneksi dengan sumber terbarukan. Jaringan disebut aktif bila memiliki sistem monitoring, sistem komunikasi, dan sistem kontrol yang handal untuk kegiatan preventif dan korektif. Jaringan aktif juga harus bersifat fleksibel, adaptif, dan cerdas. Manajemen jaringan aktif mendapat perhatian besar dalam pengembangan *smart grid*. Salah satu contoh jaringan aktif yang otonom adalah *Microgrid*.



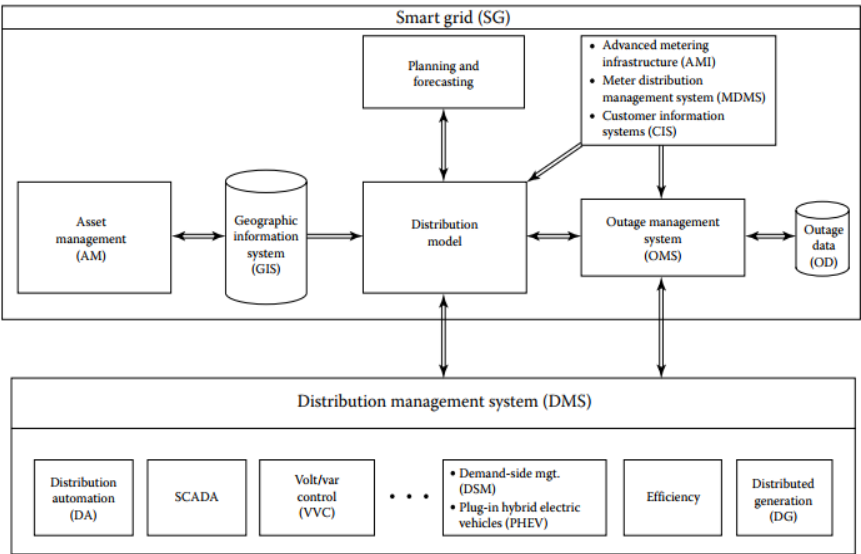
Gambar 4.5. Aplikasi Solar Pnasil di Bruchweg stadium- FSV Mainz 05, Jerman
(Sumber : SMA Solar Technology AG)

Selain itu, pada jaringan distribusi aktif, regulator tegangan pada sistem selamai ini dirancang untuk situasi radial murni, yaitu aliran daya selalu dari arah yang sama (dari gardu induk). Pada jaringan ini mungkin tidak akan berfungsi dengan benar jika aliran daya berasal dari arah yang berlawanan. Misalnya saja, hal ini dapat menaikkan tegangan sistem saat beban turun, sehingga terjadi overvoltage, atau dapat juga menurunkan tegangan saat beban naik, sehingga terjadi voltage drop.

Oleh karena itu, perlu digunakan pengontrol regulator tegangan dua arah untuk menangani konfigurasi ulang feeder. Konfigurasi ulang feeder dapat menjadi lebih sering terjadi karena beban dipindahkan ke feeder lain selama pemulihan layanan atau karena adanya ONR untuk mengurangi kerugian. Secara umum, DG dengan ukuran yang cukup dapat membalikkan aliran daya. Hingga saat ini, belum ada definisi yang diterima secara umum tentang manajemen jaringan aktif. Namun, ada definisi yang dapat diterima tentang jaringan aktif. Berdasarkan definisi tersebut, jaringan aktif mencakup DG, energi terbarukan, monitoring, komunikasi dan pengendalian, serta tindakan pencegahan dan perbaikan yang

didefinisikan sebagai jaringan yang mampu bersifat fleksibel, dapat diadopsi, otonom, dan cerdas. Selanjutnya, manajemen jaringan aktif mencakup pengiriman, konfigurasi ulang jaringan, batasan dinamis, manajemen tingkat kesalahan, manajemen sisi permintaan (DSM), dan kontrol tegangan aktif.

4.2.2 Integrasi Smart Grid dengan Manajemen Sistem Distribusi



Gambar 4.6. Integrasi Manajemen Sistem Distribusi dengan *Smart Grid*

(Sumber : IEEE PES Power & Energy Society)

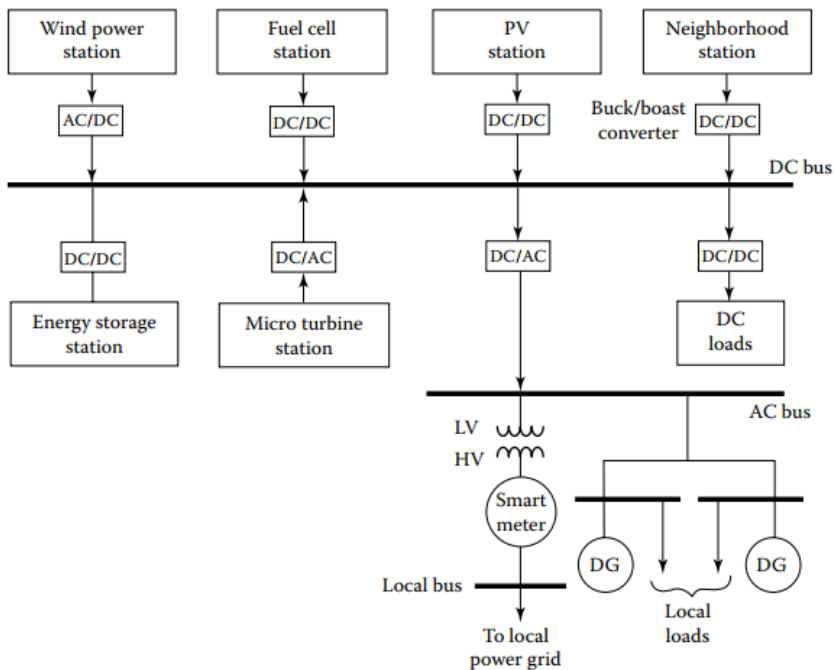
Gambar 4.6 menunjukkan integrasi Manajemen Sistem Distribusi (DMS) dengan *smart grid*. Model tersebut melibatkan perencanaan dan peramalan, sistem manajemen pemadaman (OMS), pengumpulan data pemadaman, AM, yang melibatkan sistem informasi geografis (GIS), AMI, sistem manajemen distribusi meter (MDMS), sistem informasi pelanggan (CIS), sebagai contoh model sistem distribusi aktif. Pada gambar juga menjelaskan kontrol pengawasan dan akuisisi data (SCADA), VVC, efisiensi, DSM, DG, dan PHEV.

4.3 Smart Microgrid

Seperti yang diungkapkan secara ringkas oleh Farhangi [2], *smart grid* adalah kumpulan dari semua teknologi, konsep, topologi, dan pendekatan yang memungkinkan untuk mempertahankan hierarki pembangkitan, transmisi, dan distribusi untuk digantikan dengan sistem end-to-end yang cerdas, lingkungan yang terintegrasi penuh di mana proses bisnis, tujuan, dan kebutuhan seluruh pemangku kepentingan didukung oleh pertukaran data, layanan, dan transaksi yang efisien. Oleh karena itu, *smart grid* didefinisikan sebagai jaringan yang mengakomodasi beragam pilihan pembangkitan, misalnya terpusat, terdistribusi, terputus-putus, dan *mobile*. Dengan demikian dapat memberi pelanggan kemampuan untuk berinteraksi dengan Manajemen Sistem Distribusi untuk menyesuaikan penggunaan energi dan mengurangi biaya energi. *Smart Grid* juga harus menjadi sistem yang memiliki kemampuan untuk *self-healing* untuk memperkirakan kegagalan yang akan datang dan mengambil tindakan perbaikan yang diperlukan untuk menghindari atau mengurangi masalah sistem. Jaringan cerdas menggunakan TI untuk terus mengoptimalkan penggunaan aset modalnya sambil meminimalkan operasional dan biaya pemeliharaan [2].

Namun, *smart grid* tidak boleh dilihat sebagai pengganti jaringan tenaga listrik yang ada saat ini, melainkan sebagai pelengkap. Dengan demikian, *smart grid* dapat hidup berdampingan dengan jaringan listrik yang ada saat ini, menambah kemampuan, fungsi, dan kapasitasnya melalui jaringan-jaringan yang diupgrade atau mengalami perbaikan. Hal ini menentukan topologi *smart grid* yang memungkinkan pertumbuhan, penyertaan teknologi tinggi, dan kompatibilitas penuh dengan sistem yang ada saat ini [2].

Smart grid juga dapat didefinisikan sebagai integrasi ad hoc dari komponen, subsistem, dan fungsi yang saling melengkapi di bawah kendali ekstensif sistem perintah dan kendali yang sangat cerdas dan terdistribusi.



Gambar 4.7. Skema DC dan AC dari Sistem DG *microgrid*
(Sumber : IEEE PES Power & Energy Society)

Selain itu, pertumbuhan dan perubahan jaringan listrik menuju *smart grid* dicapai dengan dimasukkannya jaringan *microgrid*. Di sini, *microgrid* didefinisikan sebagai jaringan sistem energi terdistribusi yang saling terhubung, termasuk beban dan sumber daya. Jadi dapat berfungsi baik tersambung maupun terpisah dari jaringan tenaga listrik [2]. Seperti yang diungkapkan secara ringkas oleh Keyhani [19], sistem *smart microgrid* terdiri dari sumber energi terbarukan dengan konverter daya terkait, transformator efisien, dan sistem penyimpanan. Menurut Keyhani [19], sistem DG energi terbarukan *mikrogrid* juga harus dirancang untuk memberikan tindakan cerdas sebagai manajer optimalisasi jaringan yang akan memfasilitasi pengendalian berbagai beban pelanggan sesuai dengan tren harga dan tekanan jaringan dengan mengubah penggunaan daya oleh pelanggan. Hal ini dicapai dengan *smart meter* dalam hal mengurangi beban pelanggan dan

diwakili oleh sebuah node yang disebut *locational marginal pricing* (LMP). Biaya ini merupakan biaya energi di lokasi. Gambar 4.7 menunjukkan skema dc dan ac dari sistem DG *microgrid*.

Gambar 4.8 menunjukkan skema ac dari sistem DG *microgrid*. Pada sistem ini, sumber energi terbarukan dari mikroturbin atau sumber terbarukan lainnya, misalnya pembangkit listrik tenaga angin dan stasiun pembangkit listrik tenaga surya, dapat dihubungkan ke bus DC atau AC, menggunakan konverter standar yang dapat diganti. Sistem *microgrid* harus mampu beroperasi baik dalam operasi tersinkronisasi dengan jaringan listrik lokal maupun dalam *Island Mode*. Inverter sistem *microgrid* harus mampu mengendalikan daya reaktif ujung aktif pada faktor daya lagging, leading, atau satuan. Namun, kendali tegangan, yaitu kendali daya reaktif (vars), diserahkan kepada manajemen sistem jaringan listrik lokal.

DAFTAR PUSTAKA

- Gönen, T.: Electric Power Distribution System Engineering, 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 2008.
- Farhangi, H.: The path of the smart grid, IEEE Power Energy Mag., 8(1), January/February 2010, 18–28.
- U.S. National Institute of Standards and Technology: NIST framework and roadmap for smart grid interoperability standards, Release 1.0, September 2009, Washington, DC.
- Gellings, C. W.: The Smart Grid, CRC Press, Boca Raton, FL, 2009.
- McDonald, D. J.: Substation integration and automation, Electric Power Substation Engineering, Chapter 7, CRC Press, Boca Raton, FL, 2003.
- Sciacca, S. C. and W. R. Block: Advanced SCADA concepts, IEEE Comput. Appl. Power, 8(1), January 1995, 23–28.
- Gönen, T.: Engineering Economy for Engineering Managers: With Computer Applications, Wiley, New York, 1990.
- Gönen, T.: Electric Power Transmission System Engineering, 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 2009.
- Amin, M. and B. F. Wollenberg: Toward a smart grid-power delivery for the 21st century, IEEE Power Energy Mag., 3(5), September/October 2005, 34–41.
http://www.oe.energy.gov/DocumentsandMedia/SGSRMain_lowres.pdf
- Farhangi, H.: Intelligent microgrid research at BCIT, Proceedings of IEEE Electric Power System Conference, (EPEC'08), Vancouver, British Columbia, Canada, October 2008, pp. 1–7.
- FERC: Assessment of Demand Response and Advanced Metering, 2007 Staff Report, September 2007 [on line]. Available: <http://www.ferc.gov/legal/staff-reports/09-07-demand-response.pdf>
- Kintner-Meyer, M., K. Schneider, and R. Pratt: Impacts assessment of plug-in hybrid vehicles on electric utilities and regional U.S. power grids. [on line]. Available: http://www.pnl.gov/energy/eed/etd/pdfs/phev_feasibility_analysis_combined.pdf
- IEEE PES Power & Energy Society, Smart distribution systems

- tutorial, IEEE PES General Meeting, Minneapolis, MN, July 2110.
- Gnadt, P. A. and J. S. Lawler: Automating Electric Utility Distribution Systems, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1990.
- Gönen, T.: Modern Power System Analysis, 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 2013.
- More, D. and D. McDonnell: Smart grid meets distribution utility reality, *Electric Light & Power*, March 2007, 85(2)1–6.
- Keyhani, A.: Design of Smart Power Grid Renewable Energy Systems, Wiley, Hoboken, NJ, 2011.
- Bricker, S., L. Rubin, and T. Gönen: Substation automation techniques and advantages, *IEEE Comput. Appl. Power*, 14(3), July 2001, 31–37.

BAB 5

TEKNOLOGI PERALATAN LISTRIK CERDAS

Oleh Dwi Sasmita Aji Pambudi

5.1 Pendahuluan

Teknologi peralatan listrik cerdas telah membawa perubahan berarti dalam pengelolaan energi, dan memberikan dampak signifikan dalam memahami, menggunakan, dan mengelola energi listrik. Seiring dengan kemajuan di bidang teknologi informasi dan komunikasi, peralatan listrik cerdas memberikan solusi inovatif untuk mengoptimalkan penggunaan energi dan meningkatkan efisiensi di berbagai sektor bidang dalam kehidupan sehari-hari. Peralatan listrik cerdas dirancang dengan mengintegrasikan kecerdasan buatan dan konektivitas antar perangkat listrik yang memungkinkan adanya kontrol lebih baik, pemantauan secara *real-time*, dan adaptasi secara otomatis terhadap kebutuhan energi pengguna.

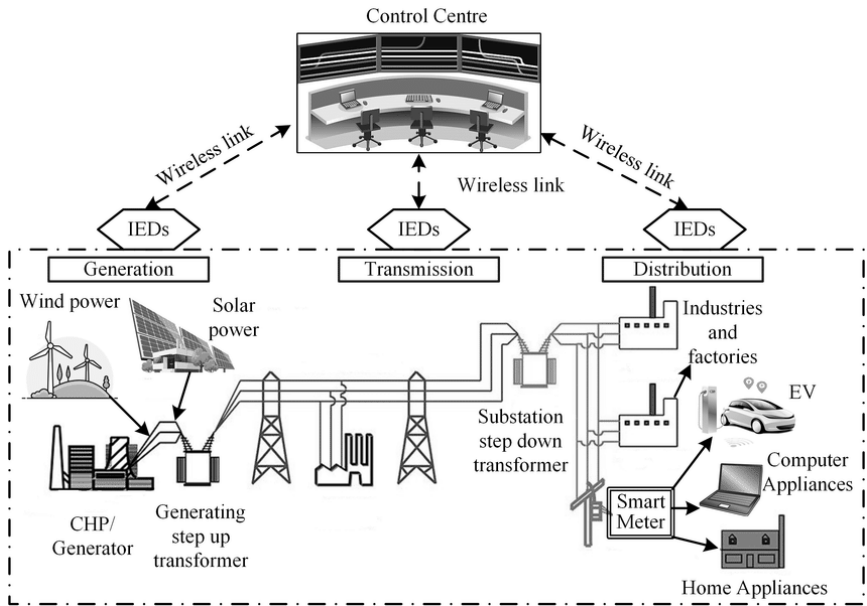
Pertumbuhan pesat dalam pengembangan teknologi peralatan listrik cerdas mendorong transformasi signifikan dalam rumah tangga, industri, dan infrastruktur energi. Munculnya *smart meter* menjadi tonggak penting dalam perkembangan teknologi peralatan listrik cerdas. Alat ini memungkinkan pengukuran konsumsi energi secara *real-time*, memberikan informasi akurat terhadap tingkat penggunaan daya. Informasi tersebut dapat bermanfaat bagi pengguna untuk mengidentifikasi potensi penghematan energi dan membuat keputusan yang lebih cerdas terkait pola konsumsi energi yang diaplikasikan. Sehingga, adanya penerapan *smart meter* mampu memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang aspek-aspek kritis dalam manajemen energi.

Peralatan listrik cerdas juga menghadirkan kemampuan otomatisasi yang luar biasa, seperti *smart lighting*. Peralatan tersebut mampu memberikan pencahayaan otomatis yang dapat diatur untuk mengoptimalkan penggunaan energi dan menciptakan lingkungan yang nyaman berdasarkan aktivitas dan preferensi waktu yang diinginkan dalam sehari.

Tidak hanya diaplikasikan di skala rumah tangga, teknologi peralatan listrik cerdas juga diterapkan dalam jaringan distribusi energi melalui *smart grid*. *Smart grid* memungkinkan penyedia layanan listrik untuk mengelola dan merespon kebutuhan energi secara lebih dinamis, meningkatkan keandalan dan keefisienan infrastruktur energi secara keseluruhan. *Smart grid* mampu mengurangi kompleksitas jaringan distribusi energi sehingga memungkinkan respon yang lebih cepat terhadap fluktuasi dalam permintaan dan pasokan energi. Dengan demikian, peralatan listrik cerdas tidak hanya memberikan manfaat khusus saja kepada pengguna, tetapi juga berkontribusi pada transformasi lebih besar menuju sistem energi yang berkelanjutan dan adaptif.

Teknologi peralatan listrik cerdas melibatkan berbagai komponen yang bekerja bersama untuk menciptakan sistem yang cerdas dan efisien. Sensor dan peralatan *monitoring* menjadi elemen penting dalam mendukung teknologi peralatan listrik cerdas. Peralatan tersebut ditempatkan di berbagai titik dalam jaringan listrik untuk memantau parameter kritis seperti tegangan, arus, dan kualitas daya. Sistem manajemen energi menggunakan perangkat lunak cerdas untuk mengoptimalkan distribusi energi, meminimalkan kehilangan daya, dan mengintegrasikan sumber energi terbarukan.

Dalam konteks lebih luas, peralatan listrik cerdas bukan hanya menjadi bagian dari *small appliance* saja, tetapi juga berperan penting dalam meningkatkan keandalan dan keberlanjutan infrastruktur energi secara keseluruhan. Dengan terus berkembangnya teknologi ini, inovasi-inovasi canggih dari peralatan listrik cerdas akan terus dihasilkan mengikuti kebutuhan energi di masa depan yang lebih berkelanjutan dan efisien dalam penggunaan energi.



Gambar 5.1. Contoh Pengaplikasian Peralatan Listrik Cerdas (*Intelligent Electronic Device / IED*) pada *Smart Grid* dalam Sistem Tenaga Listrik
(Sumber : Ruhul Amin et al., 2021)

5.2 Peran Teknologi Kecerdasan Buatan dalam Peralatan Listrik Cerdas

Teknologi kecerdasan buatan atau yang dikenal sebagai *Artificial Intelligence* (AI) memainkan peran sentral dalam menghadirkan keunggulan yang signifikan pada peralatan listrik cerdas. Peralatan listrik cerdas didefinisikan oleh kemampuannya untuk mengumpulkan, menganalisis data, dan memberikan respons yang lebih adaptif dan efisien berdasarkan situasi operasional. Berikut adalah beberapa peran utama teknologi kecerdasan buatan dalam peralatan listrik cerdas.

1. Pemantauan dan Identifikasi Cerdas

Teknologi AI memungkinkan peralatan listrik cerdas untuk terus-menerus memantau kondisinya sendiri dan mendeteksi secara dini potensi masalah atau kegagalan. Penerapan teknologi ini mencakup penggunaan sensor dan algoritma kecerdasan buatan untuk menganalisis data

operasional, memprediksi potensi kerusakan, dan memberikan informasi yang berguna untuk perawatan preventif.

2. Otomatisasi Operasional

Teknologi AI memungkinkan peralatan listrik cerdas untuk melakukan tugas-tugas operasional secara otomatis tanpa intervensi manusia. Ini termasuk pengaturan daya, penyesuaian tegangan, atau bahkan isolasi otomatis dari jaringan saat terdeteksi adanya gangguan. Peralatan listrik cerdas dapat mengoptimalkan operasionalnya sendiri berdasarkan kondisi dan permintaan saat itu.

3. Kontrol Adaptif dan Responsif

Kecerdasan buatan memungkinkan peralatan listrik cerdas untuk memberikan respons yang lebih adaptif terhadap dinamika dalam sistem tenaga listrik. Ini mencakup kemampuan untuk mengatasi fluktuasi beban, menyinkronkan dengan sumber energi terbarukan, dan merespons perubahan kondisi jaringan dengan lebih cepat.

4. Manajemen Energi Efisien

Peralatan listrik cerdas dengan teknologi AI dapat mengelola penggunaan energi dengan lebih efisien. Mereka dapat mengidentifikasi pola konsumsi energi, memberikan rekomendasi untuk pengoptimalan penggunaan energi, dan bahkan beradaptasi dengan preferensi pengguna untuk mengurangi konsumsi energi secara keseluruhan.

5. Interkoneksi dan Komunikasi

Kecerdasan buatan mendukung peralatan listrik cerdas untuk terhubung dan berkomunikasi dengan perangkat lain, sistem pusat, atau platform jaringan. Ini memungkinkan pertukaran informasi secara *real-time*, memfasilitasi sinkronisasi antar perangkat, dan memungkinkan sistem yang lebih terintegrasi.

6. Keamanan dan Perlindungan

Teknologi AI dapat digunakan untuk meningkatkan keamanan peralatan listrik cerdas dengan mendeteksi dan merespons ancaman atau serangan siber. Peralatan cerdas dapat dilengkapi dengan sistem kecerdasan buatan yang

dapat mengidentifikasi pola perilaku mencurigakan atau potensi risiko keamanan.

Pengembangan sistem energi dan listrik cerdas menjadi semakin mendesak guna mendorong revolusi produksi dan konsumsi energi, serta membangun sistem energi yang bersih, rendah karbon, aman, dan efisien. Teknologi kecerdasan buatan dengan fitur menarik seperti *deep learning*, *cross-border integration*, *man-machine cooperation*, *open group intelligence*, dan *autonomous control* menunjukkan kemampuan yang baik dalam mendukung kecerdasan perseptual (*perceptual intelligence*), kecerdasan komputasional (*computational intelligence*), dan kecerdasan kognitif (*cognitive intelligence*). Ini menunjukkan potensi besar dalam pengaplikasian untuk menentukan metode produksi dan penggunaan energi listrik (C. Li, 2019).

Kombinasi kecerdasan buatan dengan komputasi awan (*cloud computing*), *big data*, *Internet of Things* (IoT), dan *mobile interconnection* dapat memberikan sistem kelistrikan dengan fitur interaksi cerdas (*smart*), keamanan (*safety*), dan kemampuan kendali (*controllability*). Dengan demikian, keamanan (*security*), keandalan (*reliability*), dan fleksibilitas (*flexibility*) dari sistem kelistrikan dapat ditingkatkan secara signifikan (Chandra Das et al., 2021).

5.3 Komponen Penyusun Peralatan Listrik Cerdas

Peralatan listrik Cerdas yang juga dikenal sebagai *Intelligent Electrical Device* atau *Intelligent Electronic Device* (IED) merupakan perangkat elektronik kontrol terintegrasi berbasis mikroprosesor yang memiliki kemampuan cerdas dalam mengelola peralatan sistem tenaga listrik, seperti pemutus sirkuit (*circuit breakers*), transformator (*transformers*), dan bank kapasitor (*capacitor banks*).

Secara umum, Peralatan Listrik Cerdas (IED) terdiri dari regulator tegangan berbasis mikroprosesor (*microprocessor-based voltage regulators*), relay proteksi (*protection relays*), *tap changer*, pengendali pemutus sirkuit (*circuit breaker controllers*), pengendali *recloser*, *capacitor bank switches*, dan komponen lainnya, dengan kemampuan komunikasi serial dengan perangkat lain (iGrid T&D,

2017). IED memiliki kemampuan untuk terhubung ke jaringan lokal (LAN) dan berkomunikasi dengan perangkat lain melalui jaringan tersebut, serta memiliki kemampuan untuk melakukan pemrosesan data.

Dari berbagai macam IED yang tersedia, *relay IED* yang merupakan jenis yang paling umum digunakan untuk tujuan otomatisasi dalam sistem tenaga listrik. *Relay* proteksi digital (*digital protective relays*), merupakan fungsi dasar dari IED. Selain itu, *smart meter* yang digunakan untuk otomatisasi rumah juga termasuk dalam kategori IED, begitu juga dengan *Programmable Logic Controller* (PLC) yang sering digunakan dalam sistem otomatisasi. Dengan demikian, peralatan IED telah menjadi komponen dasar dalam mengotomatisasi sistem tenaga listrik (Csanyi, 2019).

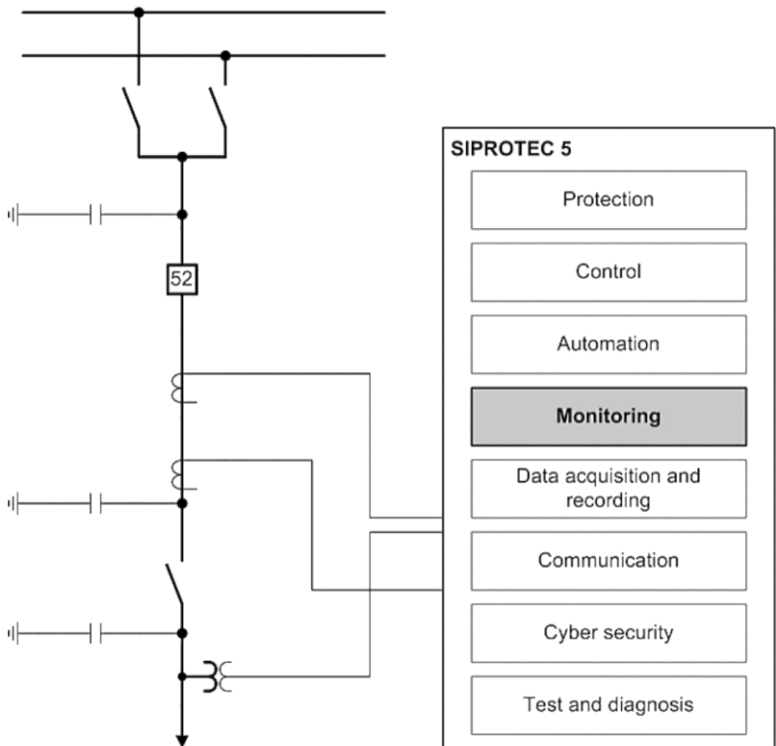
Perangkat IED biasanya digunakan di berbagai aplikasi dalam otomatisasi sistem tenaga listrik untuk tujuan pemantauan (*monitoring*), perlindungan (*protecting*), komunikasi (*communicating*), kontrol (*controlling*), pengukuran (*metering*), dan sebagainya, seperti pada sistem distribusi dan transmisi daya. Peralatan IED dapat merekam keseluruhan kondisi parameter listrik yang berguna dalam analisis pasca kondisi dan deteksi gangguan, serta perekaman gelombang dengan pengukuran kualitas daya (Electronics Coach, n.d.).

menggunakan mikroprosesor untuk melakukan beberapa fungsi perlindungan proteksi, kontrol, dan fungsi serupa. Sebuah IED biasanya dapat terdiri dari 5 sampai 12 fungsi proteksi, 5 sampai 8 fungsi kontrol yang mengendalikan perangkat terpisah, fungsi *autoreclose*, fungsi *self-monitoring*, fungsi komunikasi, dan fungsi lainnya. Penjelasan lebih lengkap dari fungsi IED (*Intelligent Electronic Devices*) diantaranya adalah sebagai berikut (Stutvoet, n.d.).

1. Monitoring

Peralatan IED memantau kondisi sirkuit internal dan eksternal, memastikan sinkronisasi secara *real-time* dari kondisi kelistrikan yang sedang berlangsung. Setiap peralatan IED juga harus memiliki *monitoring* internal dan *monitoring supply* tambahan. *Output contact* dari "*watch-dog*" atau "*healthy*" akan menutup (*close*) jika peralatan IED beroperasi dengan baik.

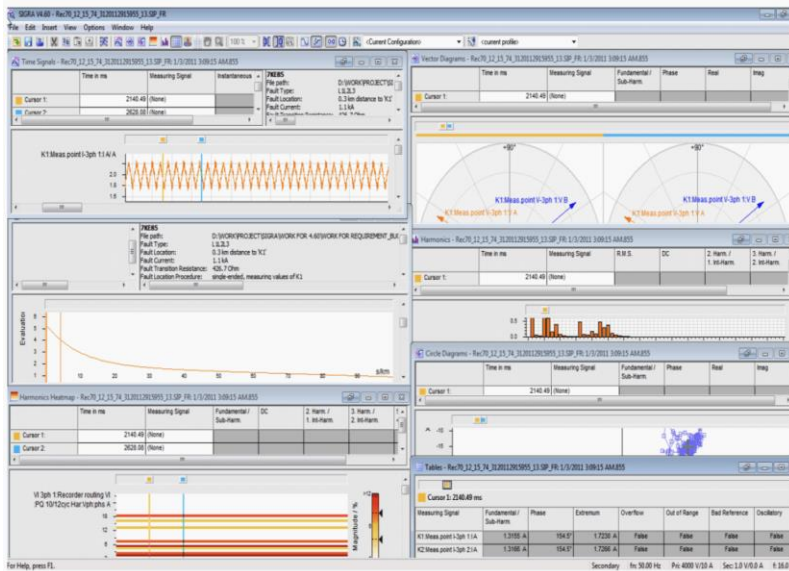
Monitoring juga dapat mencakup adanya *loss* pada *input* sensor analog, pengawasan *trip* pada sirkuit, perekaman kondisi, dan lainnya.



Gambar 5.2. *Monitoring* Internal dan Eksternal pada Peralatan Listrik Cerdas
(Sumber : Csanyi, 2019)

2. Akses Data

Peralatan IED dapat mengakses data parameter listrik, baik secara lokal maupun dari jarak jauh.



Gambar 5.3. *Event Reporting dan Fault Diagnosis* pada Peralatan Listrik Cerdas
(Sumber : Csanyi, 2019)

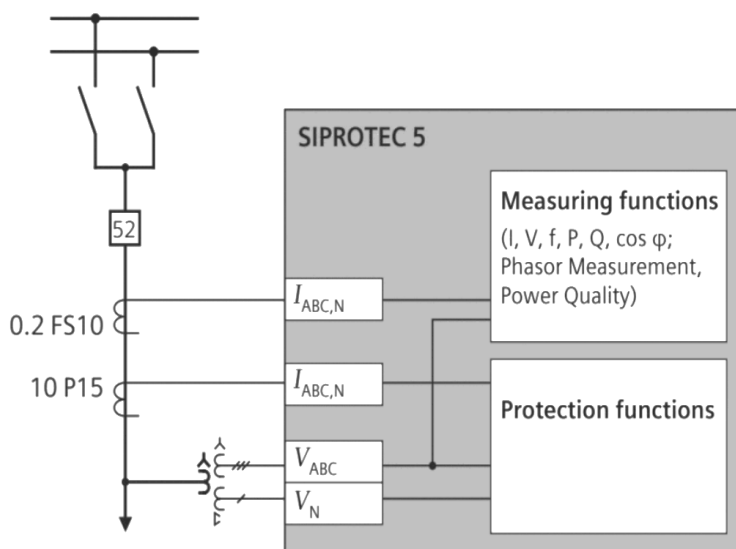
3. Pengukuran

Sebagian besar peralatan IED menyediakan pengukuran termasuk nilai tegangan (V), tegangan *line* (V), tegangan residual (V), arus fasa (A), arus netral (A), daya (MW, MVar, MVA), frekuensi (Hz), energi (kWh, KVArh), harmonisa, perekaman gangguan, suhu, dan *analog channel*. Beberapa peralatan IED juga dilengkapi dengan *output* transduser yang dapat diprogram.

4. Proteksi

Peralatan IED mencakup semua fungsi proteksi untuk melindungi generator, motor, transformator, atau *feeder* listrik. *Relay* proteksi yang terdapat pada IED digunakan untuk mendeteksi gangguan atau kondisi abnormal dalam sistem tenaga listrik dan mengambil tindakan yang tepat dan respon cepat untuk melindungi peralatan dan menjaga keandalan sistem. *Relay* proteksi ini umumnya terhubung ke peralatan sistem tenaga listrik yang ada di lapangan. *Relay* proteksi bekerja berdasarkan *input* dari transformator arus dan

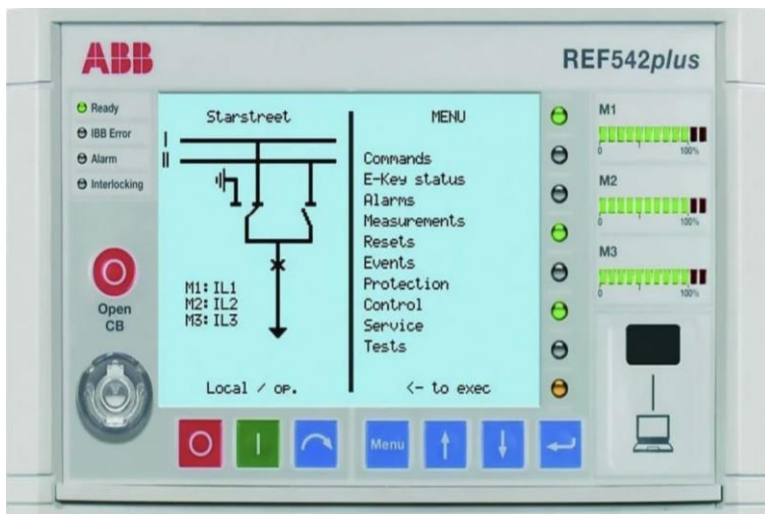
transformator tegangan, dengan jenis khusus untuk proteksi. Transformator arus dan transformator tegangan ini digunakan untuk mengukur arus dan tegangan yang mengalir dalam sirkuit/jaringan listrik dan mengirimkan informasi ke *relay* proteksi untuk dilakukan analisis dan pengambilan keputusan.



Gambar 5.4. Fungsi Pengukuran dan Proteksi pada Peralatan Listrik Cerdas
(Sumber : Csanyi, 2019)

5. Fungsi Kontrol dan Logika

Fungsi yang mencakup *control loop* pada regulator tegangan, logika kontrol pada *circuit breaker*, dan lainnya. Topologi *bus* dan pemutus (*breaker*) termasuk isolator, sakelar pemisahan, dan banyak konfigurasi lainnya dapat diprogram menggunakan *software* dalam mode tampilan grafis. Mode teks dari layar LCD digunakan untuk pengaturan dan tampilan lengkap nilai pengukuran dalam unit primer atau sekunder.



Gambar 5.5. Tampilan LCD dari *Relay* Proteksi ABB REF 542plus HMI
(Sumber : Csanyi, 2019)

6. Komunikasi Serial

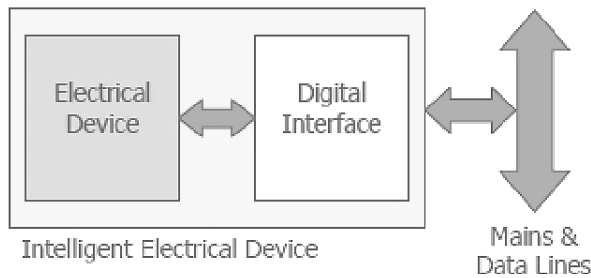
IED biasanya memiliki kemampuan untuk berkomunikasi dengan perangkat lain dalam jaringan, termasuk pusat kendali dan sistem *monitoring*. Peralatan IED mendukung protokol seperti Modbus TCP, Modbus RTU, Profibus, dan lainnya. Sebagian besar peralatan IED memiliki *port* komunikasi dan dukungan bawaan untuk protokol komunikasi standar (DNP3, IEC104, atau IEC 61850), sehingga peralatan IED dapat berkomunikasi langsung dengan sistem SCADA atau *Programmable Logic Controller* (PLC) *substation*, atau juga dapat terhubung ke RTU *substation* yang bertindak sebagai *gateway* menuju server SCADA. Beberapa peralatan IED terbaru dirancang untuk mendukung standar modern IEC 61850 untuk *substation automation* (pengendalian otomatis peralatan di gardu induk), yang memungkinkan interoperabilitas (kemampuan sistem atau perangkat untuk saling beroperasi atau berkomunikasi dengan sistem atau perangkat lainnya) antara peralatan IED dari berbagai pabrikan dengan kemampuan komunikasi yang canggih.

Peralatan IED digunakan sebagai alternatif atau pelengkap yang lebih modern dibanding konfigurasi *Remote Terminal Unit* (RTU) yang masih konvensional. Berbeda dengan RTU, peralatan IED terintegrasi dengan perangkat yang dikendalikan dan terdiri dari seperangkat *measuring points* dan *control points* yang terstandarisasi dan lebih mudah untuk dikonfigurasi serta memerlukan jumlah kabel yang lebih sedikit.



Gambar 5.6. Peralatan Listrik Cerdas *Protection Device* SIPROTEC 7SY8 pada LPIT (*Low Power Instrument Transformers*)
(Sumber : Siemens, 2024)

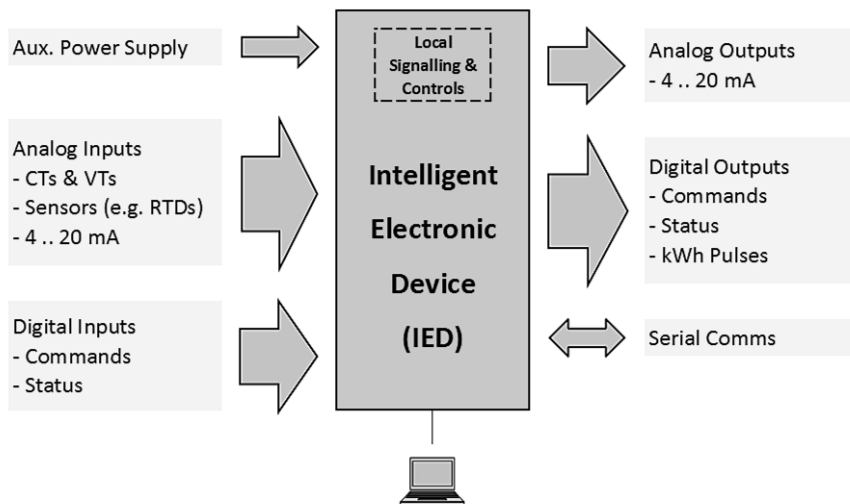
Beberapa IED dilengkapi dengan antarmuka pengguna (*User Interface*) yang memudahkan *engineer* atau operator untuk memantau dan mengkonfigurasi perangkat. Antarmuka pengguna ini bisa berupa layar sentuh atau antarmuka grafis yang *user-friendly*. Performa IED dapat ditingkatkan dan disesuaikan dengan kebutuhan yang baru tanpa harus mengganti perangkat keras (*hardware*) dengan melakukan pembaruan pada sisi perangkat lunak (*software*). Hampir semua IED dilengkapi dengan perangkat lunak *Human-Machine Interface* (HMI) untuk keperluan komisioning dan diagnosis gangguan. Perangkat lunak HMI menyediakan antarmuka dengan operator untuk dapat berinteraksi dan mengendalikan peralatan IED. HMI merupakan antarmuka grafis yang *user-friendly* bagi pengguna yang memungkinkan konfigurasi, pemantauan, dan pemecahan masalah perangkat.



Gambar 5.7. Hubungan Antarmuka Jalur Kontrol dan Komunikasi Data pada Peralatan Listrik Cerdas
(Sumber : Patel et al., 2016)

Sebagian besar IED dilengkapi dengan *keypad* dan tampilan *display*. Komponen tersebut menyediakan antarmuka fisik bagi pengguna untuk memasukkan perintah dan melihat informasi penting secara langsung pada perangkat. Ketersediaan *keypad* dan *display* bersifat opsional, dimana dalam beberapa kasus, antarmuka fisik ini mungkin disediakan berdasarkan persyaratan tertentu atau preferensi pengguna.

Berikut adalah gambar yang menunjukkan blok diagram dari sebuah *Intelligent Electronic Device (IED)*.



Gambar 5.8. Blok Diagram *Intelligent Electronic Device (IED)*
(Sumber : Siemens, 2024)

Fungsi operasi dari setiap blok dari peralatan *Intelligent Electronic Device* (IED) adalah sebagai berikut (Stutvoet, n.d.).

1. Auxiliary power supply

Peralatan IED selalu membutuhkan sumber daya tambahan, berbeda dengan *relay* proteksi konvensional, di mana sumber daya tambahan tidak begitu dibutuhkan.

Sebagian besar IED menerima pasokan daya dalam rentang tegangan 24 – 250 V DC atau 110 – 240 V AC.

2. Analog Input

Relay proteksi dan regulator tegangan dilengkapi dengan *input* yang diberikan oleh transformator arus dan transformator tegangan. Sedangkan peralatan IED dilengkapi dengan *input* sensor (bisa berupa sensor suhu) dan/atau *input* arus 4 sampai 20 mA.

3. Digital Input

Input yang diberikan kepada IED bisa berupa perintah tertentu atau informasi status apa pun. Beberapa peralatan IED memerlukan kontak (*potential free contacts*) untuk *input* (*logic*), sementara yang lain mengenali tegangan positif (*source*) atau tegangan negatif (*sink*) sebagai logika 1. *Input* digital dapat berupa perintah atau informasi status.

4. Analog output

Beberapa peralatan IED dilengkapi dengan *output* transduser, misalkan dengan rentang nilai arus 4 - 20 mA atau rentang nilai tegangan 0 - 10 V. Secara umum, *output* ini dapat diprogram dan dapat bersifat aktif atau pasif. *Output* tipe pasif memerlukan suplai daya eksternal.

5. Digital output

Kontak pada *digital output* dapat berupa *normally open*, *normally closed*, atau *solid-state*. Sama seperti *input* digital, *output* digital juga berupa perintah atau informasi status, dan kemampuan *switching* harus diperiksa dengan baik karena perbedaannya bisa terlihat dengan signifikan.

6. Port komunikasi serial

IED memiliki kemampuan transfer data secara *real-time* yang cepat dengan menggunakan berbagai port. Ada beberapa *port* yang mungkin digunakan untuk komunikasi serial seperti RS485, *ethernet* (RJ45), optik, dan lainnya.

Perangkat IED sebagian besar juga dilengkapi dengan *port* RS232 atau USB untuk komunikasi lokal dengan laptop atau PC.

5.4 Prinsip Kerja Peralatan Listrik Cerdas

Peralatan Listrik Cerdas (IED) dilengkapi dengan sensor-sensor yang memungkinkan pemantauan dan pengukuran parameter kritis dalam sistem tenaga listrik, seperti arus, tegangan, daya, dan faktor daya. Data ini memberikan informasi tentang kondisi operasional dan kinerja jaringan listrik. Peralatan Listrik Cerdas dapat merekam dan menyimpan data operasional dan kondisi pada sistem tenaga listrik. Informasi ini dapat digunakan untuk menganalisis gangguan, mengevaluasi performa, dan membuat keputusan yang lebih baik untuk perawatan dan pengelolaan sistem (P. Li et al., 2024).

Intelligent Electronic Device (IED) berfungsi sebagai perangkat proteksi dengan kemampuan untuk mendeteksi gangguan atau kondisi abnormal dalam sistem listrik. Setelah mendeteksi gangguan tersebut, IED dapat mengambil tindakan otomatis untuk melindungi peralatan dan memperbaiki kondisi listrik, dengan memberikan perintah kontrol, seperti mematikan pemutus sirkuit jika mendeteksi adanya anomali tegangan, arus, atau frekuensi, atau menaikkan/menurunkan posisi *tap* untuk menjaga level tegangan yang diinginkan. IED dapat diatur untuk melakukan fungsi operasional secara otomatis berdasarkan kondisi jaringan, seperti pemutusan sirkuit, sinkronisasi generator, dan pengaturan beban untuk mengoptimalkan efisiensi operasional.

Pengaturan (*setting*) pada IED umumnya dikontrol melalui *file* pengaturan. Pengaturan ini merinci parameter dan konfigurasi yang diperlukan oleh IED untuk beroperasi sesuai dengan kebutuhan sistem tenaga listrik. Proses pengujian *file* pengaturan ini biasanya merupakan salah satu tugas yang memakan waktu paling lama bagi seorang *tester* sistem proteksi. Seorang *tester* sistem proteksi bertanggung jawab untuk memastikan bahwa setiap IED dikonfigurasi dengan benar sesuai dengan kebutuhan spesifik sistem dan lingkungan operasionalnya. Pengujian melibatkan memeriksa *file* pengaturan, mengonfigurasi parameter sesuai

dengan persyaratan, dan memastikan bahwa IED merespon dengan benar terhadap situasi-situasi yang telah diantisipasi. Karena banyaknya parameter dan konfigurasi yang ditentukan, serta pentingnya keakuratan dalam pengaturan, proses pengujian ini seringkali membutuhkan waktu yang signifikan.

Dalam konteks pengaturan IED yang sangat kompleks, seorang *engineer* komisioning di masa lalu mungkin hanya perlu menyesuaikan beberapa komponen fisik sederhana, seperti *relay* dan beberapa saklar atau *jumper*. Namun, dengan munculnya peralatan IED yang memiliki lebih dari seribu pengaturan, adanya perangkat lunak HMI menjadi sangat penting untuk mempermudah pemantauan dan pengelolaan pengaturan tersebut. Meskipun HMI dapat membantu, namun untuk memastikan bahwa semua pengaturan sesuai dan optimal, seringkali diperlukan pengecekan ulang oleh tenaga ahlinya. Selain itu, IED juga harus diuji secara menyeluruh dengan pengaturan tersebut untuk memastikan bahwa perangkat berfungsi dengan benar sesuai dengan kebutuhan sistem.

5.5 Aplikasi *Smart Meter*

Smart meter merupakan perangkat elektronik yang dirancang untuk merekam informasi terkait konsumsi energi listrik, termasuk level tegangan, arus, dan faktor daya. Fungsi utama dari *smart meter* adalah untuk memberikan informasi yang jelas kepada konsumen mengenai pola konsumsi energi yang digunakan serta untuk memfasilitasi pemantauan sistem dan penagihan pelanggan bagi penyedia listrik. Dengan meningkatnya permintaan energi listrik secara global, terdapat kebutuhan yang semakin meningkat untuk *monitoring* konsumsi energi yang lebih efektif guna mengurangi tagihan listrik, yang mendorong adopsi sistem *smart meter*. Jika dibandingkan dengan penggunaan *meter* konvensional, *smart meter* lebih praktis karena memberikan kemampuan lebih dalam memantau dan mengendalikan konsumsi energi listrik. *Smart meter* memiliki sejumlah keunggulan, termasuk pemantauan *real-time*, kemampuan memantau dan mengendalikan konsumsi energi dari jarak jauh, serta integrasi dengan perangkat lunak eksternal untuk meningkatkan analisis data dan proses pengambilan keputusan (Exactitude Consultancy, 2022).

Meskipun *smart meter* menawarkan banyak keuntungan, penggunaannya juga meningkatkan kekhawatiran terkait keamanan data dan serangan siber. Ancaman dari dunia maya menjadi perhatian utama dalam pengembangan jaringan yang mengawasi dan mengontrol infrastruktur penting. Oleh karena itu, perlindungan terhadap akses ilegal menjadi sangat penting dalam pengembangan jaringan yang aman dan andal.

Smart meter berperan penting dalam memfasilitasi komunikasi antara konsumen dan penyedia energi dalam sistem *Smart Grid*. Berbeda dengan meteran mekanis konvensional, *smart meter* menerapkan pertukaran data digital antara rumah-rumah dan penyedia energi, memungkinkan konsumen untuk mengurangi biaya energi dengan memantau dan menganalisis penggunaan energi melalui Sistem Manajemen Energi Rumah (*Energy Management System/EMS*). EMS memungkinkan konsumen untuk melacak pola konsumsi energi secara detail, mengakses informasi harga *real-time* dari penyedia listrik, dan membuat pengaturan otomatis untuk menghindari permintaan puncak dan potensi pemadaman (US Department of Energy's Office of Electricity (OE), n.d.).

Evolusi dari meteran listrik konvensional ke meteran pintar (*smart meter*) melalui beberapa tahapan. Meteran listrik pertama berbasis prinsip elektromagnetik untuk menggerakkan motor cakram yang mengubah angka pada *visible counter*. Kecepatan peningkatan ini sebanding dengan daya yang mengalir melalui meteran elektromekanik. Meskipun kokoh dan tahan lama, meteran ini memiliki beberapa kekurangan, seperti memerlukan kunjungan lokal untuk mencatat pengukuran, hanya merekam satu pengukuran total tanpa riwayat, dan rentan terhadap manipulasi. Dalam merancang *smart meter*, beberapa karakteristik perlu diperhatikan dalam mengatasi keterbatasan tersebut dan memberikan keuntungan tambahan bagi perusahaan distribusi listrik dan konsumen akhir (*end user*) (Carou Álvarez & Ramón, 2023).

Smart meter dapat digolongkan ke berbagai jenis tergantung pada jumlah fasa listrik, teknologi komunikasi data, dan konsumen pengguna akhirnya. Secara umum, meteran ini dibedakan menjadi fasa tunggal dan tiga fasa, dengan yang pertama sering digunakan di

rumah tangga dan yang kedua di berbagai bangunan komersial dan industri. Dalam hal teknologi, *smart meter* menggunakan beragam metode komunikasi, termasuk PLC, radio frekuensi, dan seluler, yang masing-masing memiliki keunggulan dan aplikasi tersendiri. *Power Line Communication* (PLC) memanfaatkan saluran listrik yang sudah ada untuk mentransfer data, menawarkan sistem biaya rendah dan tahap awal. Umumnya, *smart meter* menggunakan sinyal nirkabel pada frekuensi 2,4 GHz, mirip dengan teknologi nirkabel lainnya seperti *WiFi* dan *Bluetooth*. Beberapa negara juga mengadopsi teknologi 3G untuk mentransfer data ke *server* pusat utilitas, menggunakan infrastruktur jaringan seluler yang sudah ada. Penggunaan *smart meter* meluas dari rumah tangga hingga ke sektor komersial dan industri, membantu mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan meningkatkan efisiensi energi. Di sektor industri, penerapan *smart meter* semakin populer karena manfaat infrastruktur meteran yang canggih, yang membantu dalam pengelolaan daya yang lebih efisien dan meningkatkan keselamatan serta pengawasan (Exactitude Consultancy, 2022).

Salah satu fitur utama *smart meter* adalah kemampuannya untuk diakses secara *remote*, yang memungkinkan semua operasional dilakukan secara *remote* hingga akhir masa pakainya. Ada banyak cara untuk berkomunikasi dengan *smart meter*, tetapi yang paling umum saat ini adalah melalui kabel tegangan rendah menggunakan protokol *Power Line Communication* (PLC) karena untuk menghindari penambahan infrastruktur komunikasi baru. Tantangan utama dalam komunikasi melalui saluran listrik (PLC) adalah lingkungan fisiknya yang awalnya dirancang untuk aliran energi, bukan untuk transmisi sinyal komunikasi. Impedansi kabel bisa menyebabkan penurunan tegangan dan redaman sinyal, menghambat komunikasi dengan *smart meter*. Gangguan oleh beberapa jenis beban juga menjadi masalah. Di Eropa, *band* frekuensi tertentu dialokasikan untuk PLC, namun gangguan dari perangkat seperti penyearah dan inverter dapat mengganggu komunikasi. Solusi untuk masalah ini termasuk pemasangan *filter Power Line Communication* (PLC) atau penambahan lebih banyak *node* dasar (DCU), namun kedua solusi ini memerlukan biaya operasional dan pemeliharaan. Pengembangan teknologi nirkabel

(*wireless*) memungkinkan perbaikan komunikasi antara *smart meter* dan sistem AMI. Biaya operasional yang lebih rendah dari teknologi nirkabel menjadi faktor pendorong untuk mengaplikasikan *smart meter* secara massal. Untuk akses lokal, *smart meter* sering dilengkapi dengan dua antarmuka yaitu *port* optik (*optical fiber*) untuk mengekstraksi data dengan cepat dan tampilan *display* untuk diagnosis perangkat. Akses melalui port optik memerlukan kata sandi, sementara tampilan *display* tidak memerlukan kata sandi karena informasinya dianggap tidak kritis (Carou Álvarez & Ramón, 2023).

Fitur kedua dari *smart meter* adalah kapasitas pengukuran yang lebih besar dibandingkan dengan perangkat *meter* konvensional. perangkat *meter* konvensional hanya mencatat total energi yang diukur melaluinya. Sedangkan *smart meter* memiliki kemampuan untuk mengumpulkan dan menyimpan informasi sebagai berikut (Carou Álvarez & Ramón, 2023).

1. **Konsumsi dan Pembangkitan Energi:** *Smart meter* dapat mengukur dan mencatat konsumsi dan pembangkitan energi setiap jam, harian, dan bulanan, termasuk periode konsumsi puncak, serta dapat mencatat jumlah energi reaktif.
2. **Data Penagihan:** *Smart meter* mengelompokkan data yang diperoleh berdasarkan periode penagihan yang dikonfigurasi dengan berbagai tarif seperti puncak, biasa, atau tarif dasar.
3. **Kualitas Daya:** Rekaman peristiwa terkait kualitas pasokan daya seperti variasi tegangan, penurunan tegangan, kenaikan tegangan, tegangan yang tidak seimbang, dan pemadaman listrik dapat direkam oleh *smart meter*.
4. **Deteksi Kecurangan:** *Smart meter* mampu mendeteksi kejadian terkait potensi kecurangan penggunaan listrik, seperti manipulasi meteran, pembukaan kotak penutup meteran, atau percobaan dengan kata sandi yang salah.
5. **Informasi Administratif:** Data rekaman seperti modifikasi kontrak, penyesuaian jam, dan perubahan konfigurasi dapat dicatat oleh *smart meter*.

Semua informasi ini disimpan dalam *non-volatile memory* untuk mencegah kehilangan selama pemadaman listrik, dan dipertahankan cukup lama untuk mengatasi kegagalan komunikasi

dengan sistem AMI. Meskipun beberapa parameter konfigurasi dapat diubah secara *remote*, data pengukuran energi tidak dapat diubah dalam cara apa pun untuk menjaga akurasi. Demikian pula, parameter yang memengaruhi akurasi meteran tidak dapat diubah.

Fitur ketiga dari *smart meter* adalah kemampuannya untuk menerima permintaan (*request*) tentang statusnya dan memberikan balasan (*reply*) dengan cepat. Fitur ini memungkinkan perusahaan distribusi listrik untuk mengetahui status Jaringan Tegangan Rendah (JTR) yang melayani pelanggannya dengan praktis dan *real-time*. Sehingga, perusahaan dapat secara efisien memantau kinerja jaringan dan mengatasi masalah dengan cepat jika terjadi gangguan atau kegagalan.

Fitur keempat yang terdapat pada *smart meter* yaitu kemungkinan untuk melakukan pemutusan pasokan jarak jauh (*remote off-switch*) dan pemutusan otomatis (*automatic cut-off*) jika penggunaan daya melebihi batas daya yang ditentukan. Fitur ini juga memungkinkan untuk menjalankan perintah *remote off-switch* karena tidak dibayar oleh pelanggan atau penghubungan kembali (*reconnection*) setelah tagihan telah dibayar. Di sisi lain, ini memungkinkan pembatasan daya maksimum yang diminta oleh pelanggan.

Fitur kelima dari *smart meter* adalah kemampuannya untuk mengirimkan peringatan ke sistem AMI yang disebabkan oleh beberapa kejadian tertentu. Kejadian ini dapat dikonfigurasi dan diaktifkan atau dinonaktifkan secara *remote* dari jarak jauh serta membantu dalam memonitor Jaringan Tegangan Rendah (JTR).

Fitur-fitur yang telah dijelaskan menunjukkan pentingnya dalam memenuhi persyaratan keamanan dan privasi yang tinggi. Komunikasi *smart meter* dan sistem AMI harus dienkripsi. Akses data pada *smart meter*, baik secara *remote* maupun *local*, harus dilindungi dengan menggunakan kata sandi. Data yang tersimpan dalam *smart meter* hanya dapat diakses oleh konsumen yang bersangkutan, perusahaan pasokan untuk keperluan penagihan, dan perusahaan distribusi listrik yang bertanggung jawab atas pemeliharaan Jaringan Tegangan Rendah (JTR).

Fitur yang terakhir dari *smart meter* yaitu harus memiliki sistem yang dapat ditingkatkan, yaitu *firmware*-nya, untuk menambahkan fungsionalitas baru (*update*), meningkatkan yang

sudah ada (*upgrade*), atau memperbaiki *bug* yang terdeteksi (*bug fixing*). Secara umum, *smart meter* memiliki dua jenis *firmware* internal, salah satunya untuk fungsi pengukuran dan yang lainnya untuk komunikasi. Adanya pembaruan *firmware* (*remote firmware update*) dapat memperpanjang umur pakai dari *smart meter*.



Gambar 5.9. Fitur-fitur pada *Smart Meter*
(Sumber : Carou Álvarez & Ramón, 2023)

Smart meter menjadi bagian dari sistem *Advanced Metering Infrastructure* (AMI) yang merupakan kumpulan peralatan dan sistem yang telah dikembangkan dalam beberapa tahun terakhir untuk memungkinkan manajemen cerdas dari jaringan distribusi listrik sampai dengan pengguna akhir (*end user*) terutama fokus pada jaringan tegangan rendah. Ini mencakup infrastruktur dan komponen yang mengirimkan listrik langsung ke konsumen, seperti rumah tinggal dan komersial. Jaringan distribusi listrik berperan penting dalam memastikan pengiriman listrik yang handal dan efisien kepada pengguna akhir, karena bertanggung jawab atas pengaturan tingkat tegangan dan pengelolaan aliran listrik untuk memenuhi permintaan yang bervariasi dari konsumen. *Smart meter* menjadi perangkat dasar yang diterapkan dalam sistem *smart grid*, yang tidak hanya berguna untuk pelanggan tetapi juga sebagai sensor yang menyediakan data dan informasi yang berguna bagi

operator sistem distribusi (*Distribution System Operator/DSO*). Meskipun istilah "*smart*" mungkin menimbulkan kesan bahwa perangkat *meter* tersebut adalah perangkat cerdas, namun kenyataannya, hal itu hanya dapat terjadi jika perangkat *meter* tersebut terintegrasi secara efektif dalam sistem AMI. Fitur-fitur canggih dari *smart meter* memungkinkannya untuk terintegrasi dalam sistem AMI dan menjadi bagian yang sangat penting dari infrastruktur tersebut (Carou Álvarez & Ramón, 2023).

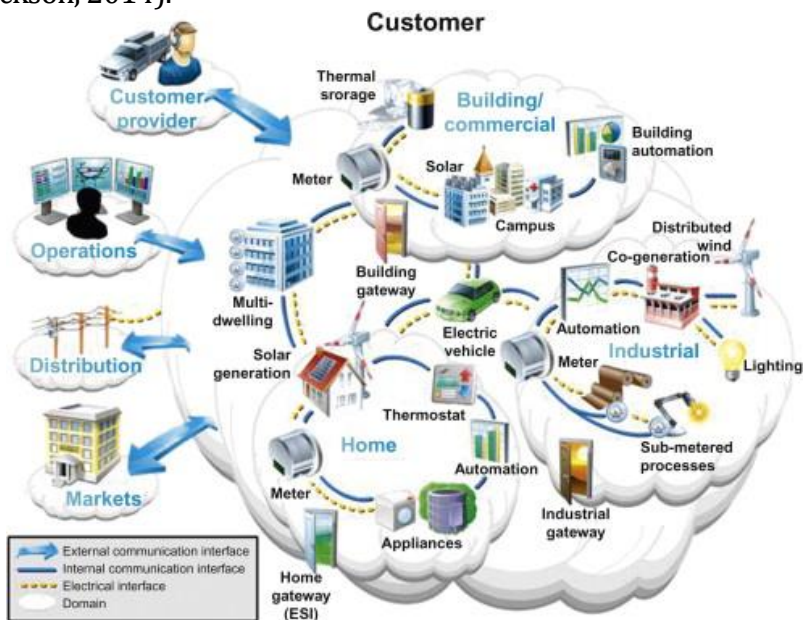
Advanced Metering Infrastructure (AMI) merupakan sistem yang terdiri dari *smart meter*, jaringan komunikasi, dan sistem manajemen data yang memungkinkan komunikasi dua arah (*two-way communication*) antara penyedia energi listrik dan konsumen yang dapat membaca konsumsi listrik dengan frekuensi yang lebih tinggi. AMI telah diadopsi di banyak negara untuk meningkatkan efisiensi dalam pengukuran konsumsi listrik. Informasi yang diperoleh dari alat *meter* ini dapat diproses secara *real-time* dan dikirimkan ke penyedia energi listrik untuk mengelola permintaan kebutuhan energi listrik. Pengelola energi listrik membutuhkan pemrosesan data yang besar untuk memahami pola beban dan merancang sinyal kontrol yang tepat agar pengelolaan jaringan distribusi dapat menjadi optimal (Carou Álvarez & Ramón, 2023).

Perangkat *meter* AMI memfasilitasi respon terhadap permintaan listrik, yang memungkinkan penyedia energi listrik mengelola permintaan listrik selama periode puncak. Dengan menyediakan data *real-time* tentang konsumsi energi, penyedia energi listrik dapat memberikan insentif kepada konsumen untuk mengurangi penggunaan listriknya selama waktu puncak, sehingga mengurangi beban pada jaringan dan menghindari kebutuhan untuk peningkatan infrastruktur yang mahal (Global Market Insights, 2023).

AMI dapat memberikan informasi terperinci tentang penggunaan listrik setiap pelanggan secara remote kepada penyedia energi listrik dalam interval waktu yang singkat, yakni setiap 15 menit atau per jam. Selain informasi penggunaan listrik, AMI juga dapat menyediakan data tambahan seperti penggunaan listrik puncak, tegangan, dan karakteristik daya lainnya. Sistem ini menggunakan berbagai jenis komunikasi untuk mentransmisikan data dari setiap *smart meter* kembali ke sistem operasional dari

penyedia energi listrik, termasuk melalui *public WiFi*, *private radio system* (*mobile communication*, *Bluetooth Low Energy/BLE*, *LoRa*, dan lainnya) dan *power line carrier system* yang mengirimkan informasi melalui jaringan distribusi listrik. *Smart meter* yang terintegrasi dalam AMI juga dapat berfungsi sebagai *radio gateways* yang memungkinkan pengontrolan dan pengembangan informasi untuk peralatan di rumah secara individu (Jackson, 2014).

Penerapan AMI atau *smart meter* ini memiliki potensi untuk mengurangi secara signifikan biaya operasional penyedia energi listrik konvensional, termasuk biaya pembacaan *meter*, layanan pelanggan, layanan lapangan, penagihan, pengelolaan tindakan pencurian/kecurangan penggunaan listrik, dan fungsi-fungsi lainnya. Sakelar layanan yang terdapat dalam *smart meter* memungkinkan penyedia energi listrik untuk menghubungkan dan memutuskan pasokan listrik kepada pelanggan tanpa perlu melakukan panggilan layanan tambahan. Dengan demikian, AMI memberikan manfaat besar dalam meningkatkan efisiensi dan mengoptimalkan operasi penyediaan listrik secara keseluruhan (Jackson, 2014).



Gambar 5.10. Ilustrasi Aliran Daya dan Informasi Data
(Sumber : Jackson, 2014)

Advanced Metering Infrastructure (AMI) AMI memfasilitasi aliran informasi dua arah antara pelanggan dan penyedia listrik, menyediakan data tentang konsumsi energi kepada kedua belah pihak dengan rincian waktu dan jumlah konsumsi serta harga listrik. Fungsionalitas AMI meliputi kontrol konsumsi jarak jauh, penetapan harga berbasis waktu, prediksi kebutuhan konsumsi, deteksi gangguan dan pemadaman, pengelolaan koneksi pengguna, deteksi pencurian/kecurangan penggunaan listrik, dan pengumpulan dana dan pengelolaan biaya yang efisien. Dengan implementasi AMI, jaringan listrik menjadi lebih cerdas dengan kemampuan untuk mengawasi dan meningkatkan kualitas daya dengan lebih baik, termasuk pencatatan dan pelaporan gangguan dan pemadaman secara cepat (Naderi et al., 2020).

Advanced Metering Infrastructure (AMI) memiliki peran penting dalam mengembangkan sistem yang dapat mengelola data dari *Smart Meter (SM)*, memberikan kemampuan komunikasi dua arah dan konektivitas yang selalu aktif, yang sangat cocok untuk penggunaan *smart home* saat ini. *Smart Home Energy Management System* merupakan aplikasi khusus layanan AMI yang digunakan untuk melakukan tiga hal berikut. Pertama, mengambil data terkait energi dari *smart meter* (seperti konsumsi energi dan informasi harga secara *real-time*). Kedua, menyimpan data terkait energi dan memberikan statistik penggunaan daya. Dan ketiga, jika diperlukan, mengendalikan perangkat pintar melalui jaringan komunikasi rumah. Dengan memanfaatkan layanan AMI, konsumen dapat mendapatkan layanan dan produk canggih yang memenuhi standar kualitas layanan yang ditetapkan berdasarkan regulasi negara (Rao & Deebak, 2022).

Smart meter berbasis *Advanced Metering Infrastructure (AMI)* merupakan alat pengukur listrik yang dilengkapi dengan sistem komunikasi digital yang canggih. Dengan AMI, pelanggan dapat melihat profil beban dan tagihan listrik secara *real-time* melalui aplikasi, memungkinkan konsumen untuk mengontrol penggunaan energi dan tagihan sesuai kebutuhan. Penggunaan *smart meter* AMI memungkinkan pembacaan meter yang sebelumnya manual menjadi digital, lebih akurat, dan menjaga privasi pelanggan. Dalam penerapannya di Indonesia, petugas tidak

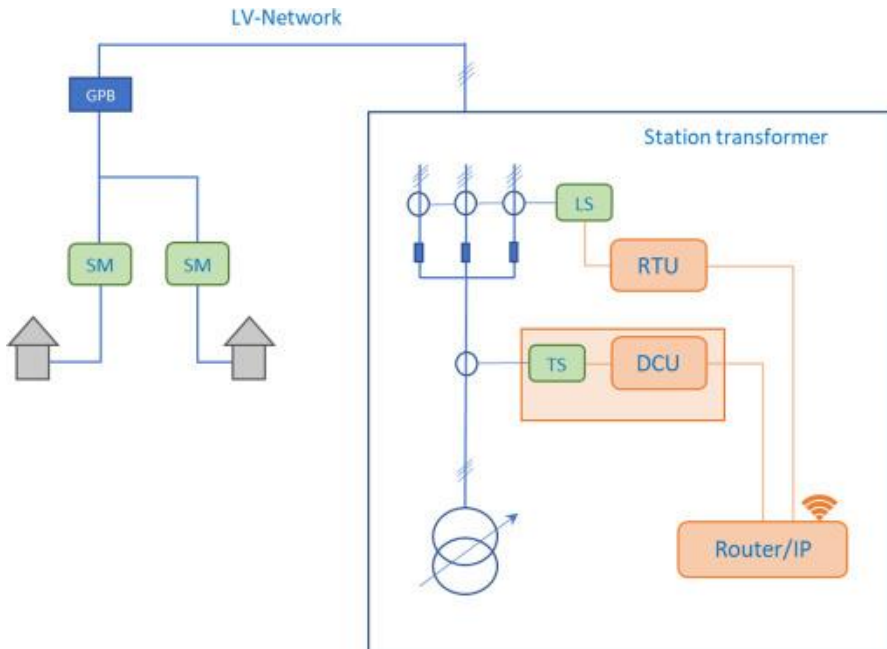
perlu lagi melakukan pembacaan meter secara manual (*door to door*), petugas hanya perlu datang ke rumah pelanggan untuk pemeliharaan atau pengecekan fisik jika diperlukan. Negara-negara yang telah menerapkan AMI berhasil menghemat energi dan biaya operasional. Contohnya, di Austria, penghematan energi mencapai 55% dan biaya operasional turun 19%, sementara di Belanda, penghematan energi mencapai 15% dan biaya operasional turun 15%. Selain untuk kelistrikan, AMI juga dapat dikembangkan menjadi produk *beyond* kWh untuk berbagai bidang bisnis seperti energi terbarukan, kendaraan listrik, dan teknologi *smart home* (PLN, 2023).

Perluasan teknologi AMI dan pemasangan *smart meter* memberikan kemudahan bagi jaringan distribusi untuk mengukur tegangan *feedback* dari tiap titik terminasi secara *online* atau dalam *quasi real-time*. Penting untuk mempertimbangkan jumlah node pengukuran yang diperlukan untuk menghasilkan solusi konservasi energi dan optimisasi energi, yang dapat berbeda tergantung pada kondisi jaringan dan algoritma optimisasi yang digunakan. Teknik pengambilan (*capturing*) dan penyaringan (*filtering*) data dapat digunakan untuk menurunkan biaya AMI terkait solusi konservasi energi, baik dalam pendekatan terpusat maupun terdesentralisasi. Dalam beberapa studi, solusi prediktif konservasi dan optimisasi energi telah diusulkan sebagai solusi masa depan untuk mengatasi fluktuasi beban dan meningkatkan keamanan sistem dengan mempertimbangkan batas keamanan terutama dalam masalah penurunan tegangan yang dapat mempengaruhi kualitas layanan (Manbachi, 2018).

Big Data, *Data Mining*, dan *Predictive Analytics*, bersama dengan *High Performance Computing* (HPC), memiliki peran penting dalam mendukung *Smart Meter* dan *Advanced Metering Infrastructure* (AMI). Pertama, *Smart Meter* menghasilkan volume data besar yang mencakup informasi tentang konsumsi energi listrik secara *real-time*. Penggunaan *Big Data* memungkinkan penyimpanan, pengolahan, dan analisis data ini dengan efisien. *Data Mining* digunakan untuk mengeksplorasi pola-pola dalam data *Smart Meter*, seperti tren penggunaan energi, pola beban, dan anomali, yang dapat memberikan informasi penting bagi penyedia layanan listrik untuk mengoptimalkan jaringan dan layanan kepada

konsumen. Selanjutnya, *Predictive Analytics* memungkinkan prediksi perilaku konsumen dan kondisi jaringan di masa depan berdasarkan analisis data historis dari *Smart Meter*. Dengan memanfaatkan teknik ini, penyedia layanan listrik dapat merencanakan dan mengelola pasokan energi secara lebih efisien, serta mengidentifikasi dan mencegah potensi gangguan atau kegagalan pada jaringan. *High Performance Computing* (HPC) mendukung pengolahan data yang cepat dan kompleks yang diperlukan untuk analisis *Big Data* dan *Predictive Analytics* dalam skala besar yang diperlukan oleh AMI. Integrasi *Big Data*, *Data Mining*, *Predictive Analytics*, dan HPC membantu menciptakan lingkungan yang cerdas dan adaptif dalam manajemen energi, memungkinkan penyedia layanan listrik untuk meningkatkan efisiensi operasional, meningkatkan keandalan jaringan, dan memberikan layanan yang lebih baik kepada pelanggan (Mack, 2014).

Smart meter, seperti yang diilustrasikan dalam gambar, berfungsi sebagai komponen dasar dalam jaringan distribusi (Jaringan Tegangan Rendah/JTR) sebagai bagian dari AMI. *Smart meter* memfasilitasi pengukuran konsumsi listrik di tingkat konsumen, menyediakan kemampuan komunikasi dan transmisi data secara *real-time*. Data ini kemudian dimanfaatkan untuk berbagai tujuan, termasuk pemantauan dan optimasi penggunaan energi, memfasilitasi permintaan kebutuhan listrik, dan meningkatkan efisiensi serta kehandalan keseluruhan jaringan. Integrasi *smart meter* ke dalam jaringan tegangan rendah merupakan kemajuan penting dalam manajemen *grid* modern, memungkinkan visibilitas, kontrol, dan efisiensi yang lebih besar dalam distribusi listrik (Carou Álvarez & Ramón, 2023).



Gambar 5.11. *Smart Meter* dalam Jaringan Tegangan Rendah (JTR)
(Sumber : Carou Álvarez & Ramón, 2023)

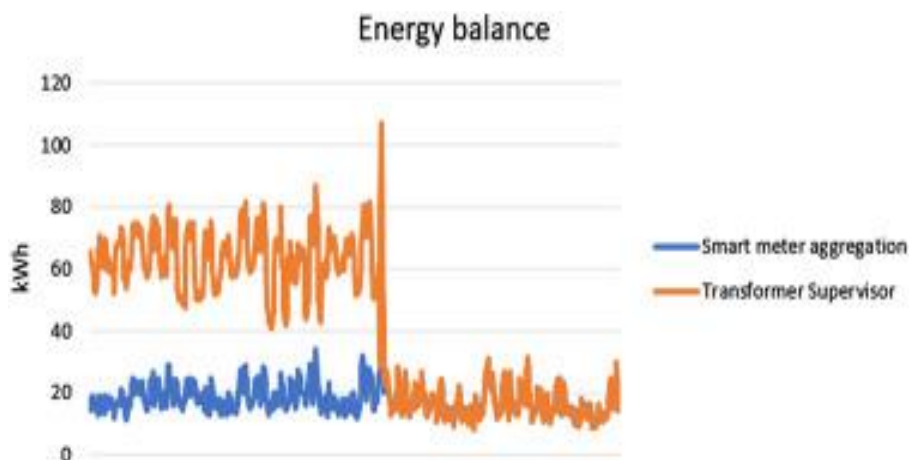
Berikut adalah komponen yang terdapat dalam jaringan distribusi (Jaringan Tegangan Rendah/JTR) (Carou Álvarez & Ramón, 2023).

1. **Smart Meter (SM):** Terpasang di antara GPB dan setiap pelanggan untuk mengukur konsumsi energi secara individual.
2. **General Protection Box (GPB):** Menandai batas antara jaringan yang dimiliki oleh perusahaan distribusi listrik dan jaringan internal yang menjadi tanggung jawab pelanggan. Perangkat *meter* biasanya terpasang di area yang dimiliki oleh pelanggan (*end user*), tetapi perusahaan distribusi listrik harus memiliki akses ke perangkat tersebut.
3. **Station Transformer (ST):** Terdapat dua *smart meter* (TS dan LS) yang memungkinkan perusahaan distribusi untuk memantau kinerja dan kondisi jaringan secara lebih detail dari seluruh JTR, dan membantu dalam pemeliharaan dan manajemen jaringan, serta meningkatkan respon terhadap gangguan atau keadaan darurat yang mungkin terjadi.

4. **Transformer Supervisor (TS):** *Smart meter* yang terpasang di sisi tegangan rendah (*Station Transformer*) dan mengukur seluruh energi yang didistribusikan di jaringan tersebut dan memberikan beberapa fungsionalitas tambahan.
5. **Line Supervisor (LS):** *Smart meter* yang dipasang di setiap jalur yang menyuplai berbagai kelompok pelanggan (*end user*) yang terhubung ke JTR dan menambah detail informasi yang diperoleh dari TS.
6. **Data Concentrator Unit (DCU):** Memungkinkan komunikasi antara *smart meter* dan sistem pusat kontrol dengan mengirimkan (*injecting*) sinyal melalui kabel tegangan rendah. TS biasanya sudah termasuk di dalam unit DCU.
7. **Remote Terminal Unit (RTU):** Mengelola komunikasi antara LS dan sistem pusat control, dengan menggunakan jaringan komunikasi internal atau eksternal, seperti serat optik atau jaringan berbasis 3G/4G, untuk berkomunikasi dengan perangkat yang terpasang di gardu induk (*Station Transformer*).

Perangkat *smart meter* memiliki berbagai manfaat yang terintegrasi dalam *smart grid*. Pertama, *smart meter* meningkatkan data yang tersedia bagi konsumen untuk membuat keputusan terbaik tentang kebiasaan konsumsi listrik oleh konsumen, seperti menjadwalkan aktivitas dengan biaya listrik tertinggi. Kedua, data historis konsumsi listrik memungkinkan konsumen menilai efisiensi perangkat rumah tangga yang dimilikinya, sementara rumah tangga yang memiliki pemanas atau pendingin udara listrik dapat mengevaluasi apakah isolasi rumah sudah memadai. Ketiga, peningkatan ketersediaan data memengaruhi hubungan antara perusahaan penyedia listrik dan konsumen dengan menyederhanakan proses penagihan dan mendorong kompetitivitas pasar listrik. Keempat, informasi tambahan dari *smart meter* memungkinkan perusahaan penyedia listrik menciptakan produk komersial baru yang disesuaikan untuk konsumen. Kelima, *smart meter* memungkinkan DSO memiliki informasi secara *real-time* dalam operasional jaringan tegangan rendah, memungkinkan deteksi dini dan penanganan cepat terhadap gangguan serta pengelolaan beban. Analisis data dari *smart meter* membantu mengevaluasi kerugian dalam jaringan dan

mendeteksi kecurangan secara lebih akurat, dengan membandingkan total energi yang diukur oleh *Transformer Supervisor* (TS) dengan total energi dari keseluruhan *smart meter* (Carou Álvarez & Ramón, 2023).

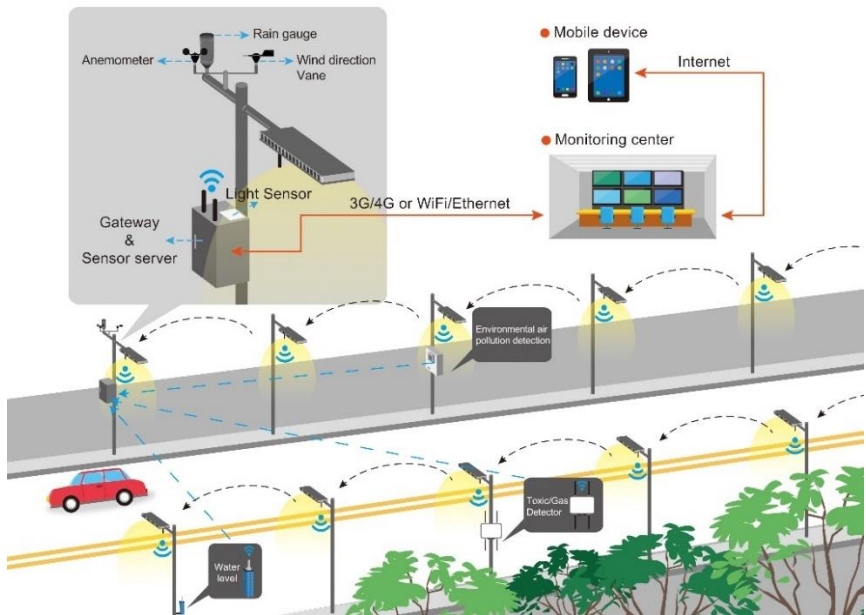


Gambar 5.12. Deteksi Kecurangan Penggunaan Listrik berdasarkan Analisis Data *Energy Balance* (Sumber : Carou Álvarez & Ramón, 2023)

5.6 Aplikasi Smart Lighting

Pada tingkat global, perkembangan teknologi telah mengubah setiap industri dengan membawa inovasi di pasar dan meningkatkan penggunaan sumber daya. Industri produk penerangan tidak terkecuali dari perubahan tersebut dan telah mengembangkan sistem pencahayaan pintar dan kontrol sebagai alternatif dari lampu-lampu teknologi lama seperti lampu pijar (*incandescent lamps*) dengan lampu-lampu *fluorescent*, CFL, dan LED. Sistem pencahayaan pintar ini dilengkapi dengan berbagai fitur seperti pengaturan waktu, sensor PIR, dan ultrasonik, yang memungkinkannya untuk secara otomatis dimatikan saat tidak digunakan pada siang hari. Selain itu, sistem ini juga mengurangi konsumsi energi dengan mengoptimalkan kontrol pencahayaan secara otomatis. Saat ini, sistem pencahayaan telah terintegrasi dengan kecerdasan buatan untuk memberikan pencahayaan pintar

yang meningkatkan suasana cahaya dan memberikan pencahayaan otomatis (Market Density, 2020).

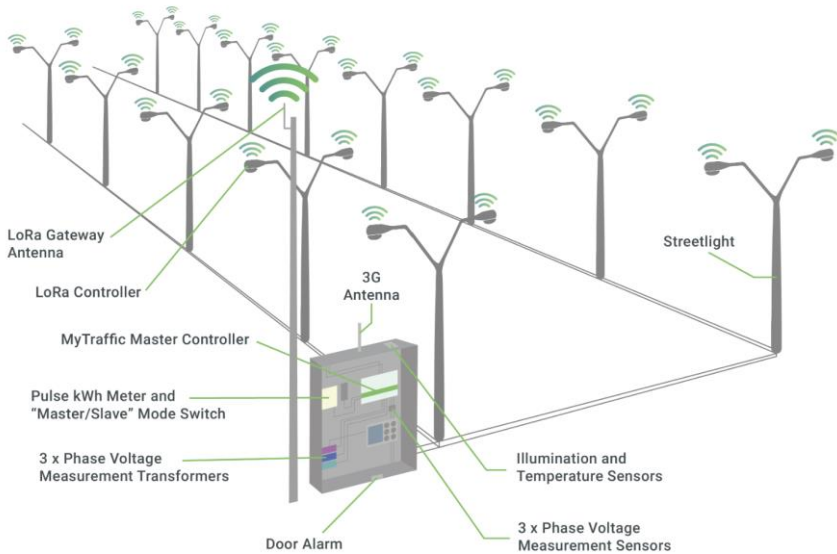


Gambar 5.13. Aplikasi *Smart Lighting* pada Lampu Penerangan Jalan
(Sumber : Market Density, 2020)

Sistem Pencahayaan Cerdas (*Smart Lighting System*) disertai dengan sensor, kontrol, pemancar nirkabel, dan mikroprosesor yang terintegrasi dalam sistem lampu LED. Sistem Pencahayaan Pintar Cerdas dapat mengelola semua lampu jalan yang terhubung secara aman dan dari jarak jauh melalui tampilan berbasis peta secara *real-time* menggunakan *web browser* standar.

Lampu penerangan jalan dapat berkomunikasi dengan *gateway* utama menggunakan jaringan LoRa untuk secara aktif mengurangi konsumsi energi dengan memungkinkan penjadwalan mudah untuk mengontrol fungsi-fungsi seperti menyalakan/mematikan lampu, pengukuran arus, indikasi kerusakan LED, dan pengaturan tingkat pencahayaan untuk lampu-lampu baik secara individual tiap lampu ataupun secara kelompok. Tingkat pencahayaan yang sesuai yang diperlukan pada setiap

waktu, musim, kondisi cuaca, atau deteksi gerakan dapat diatur untuk menanggapi berbagai kondisi lingkungan di jalan (MyTraffic, 2017).



Gambar 5.14. Aplikasi *Smart Lighting* berbasis Teknologi LoRa
(Sumber : MyTraffic, 2017)

DAFTAR PUSTAKA

- Carou Álvarez, J. M., & Ramón, L. S. 2023. Smart meters. *Encyclopedia of Electrical and Electronic Power Engineering*, 441–447. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821204-2.00067-2>
- Chandra Das, N., Ziaul Haque Zim, M., & Sazzad Sarkar, M. 2021. Electric Energy Meter System Integrated with Machine Learning and Conducted by Artificial Intelligence of Things-AIoT. *Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus* 2021, 826–832. <https://doi.org/10.1109/ElConRus51938.2021.9396280>
- Csanyi, E. 2019. *IED (Intelligent Electronic Device) advanced functions that make our life better | EEP*. <https://electrical-engineering-portal.com/ied-intelligent-electronic-device-advanced-functions>
- Electronics Coach. n.d. *What are Intelligent Electronic Devices (IED)? Block Diagram, Hardware and Software Design and Communication Module of IED - Electronics Coach*. Retrieved February 5, 2024, from <https://electronicscoach.com/intelligent-electronic-devices.html>
- Exactitude Consultancy. 2022. *Smart Electricity Meters Market / Trends, Size, Share, Growth / 2029*. <https://exactitudeconsultancy.com/reports/1818/smart-electricity-meters-market/>
- Global Market Insights. 2023. *Advanced Metering Infrastructure (AMI) Meters Market, Report 2032*. <https://www.gminsights.com/industry-analysis/ami-meters-market>
- iGrid T&D. 2017. *What is an IED - Intelligent Electronic Device? - iGrid Smart Guide*. <https://www.igrid-td.com/smartguide/gridandsubstationautomation/ied-intelligent-electronic-device/>
- Jackson, J. 2014. *Smart Grids: An Optimised Electric Power System. Future Energy: Improved, Sustainable and Clean Options for*

- Our Planet*, 633–651. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099424-6.00028-4>
- Li, C. 2019. *Artificial Intelligence Technologies for Electric Power Systems* - IEEE Access. IEEE Access. <https://ieeaccess.ieee.org/closed-special-sections/artificial-intelligence-technologies-for-electric-power-systems/>
- Li, P., Fan, Y., Liu, Z., Tian, B., Wang, Z., Li, D., Han, Z., Zhang, Z., & Xiong, F. 2024. Application status and development trend of intelligent sensor technology in the electric power industry. In *IET Science, Measurement and Technology*. John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1049/smt2.12175>
- Mack, P. 2014. Big Data, Data Mining, and Predictive Analytics and High Performance Computing. *Renewable Energy Integration: Practical Management of Variability, Uncertainty, and Flexibility in Power Grids*, 439–454. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407910-6.00035-1>
- Manbachi, M. 2018. Impact of Distributed Energy Resource Penetrations on Smart Grid Adaptive Energy Conservation and Optimization Solutions. *Operation of Distributed Energy Resources in Smart Distribution Networks*, 101–138. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814891-4.00005-9>
- Market Density. 2020. *Smart Lighting and Control Systems*. <https://www.marketdensity.com/smart-lighting-and-control-systems-market>
- MyTraffic. 2017. *Smart Lighting System*. <https://mytraffic.com.my/smart-lighting-system.html>
- Naderi, Y., Hosseini, S. H., Ghassemzadeh, S., Mohammadi-Ivatloo, B., Savaghebi, M., Vasquez, J. C., & Guerrero, J. M. (2020). Power quality issues of smart microgrids: applied techniques and decision making analysis. *Decision Making Applications in Modern Power Systems*, 89–119. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816445-7.00004-9>
- Patel, A., Patel, D., & Sathavara, R. 2016. Future smart home using intelligent electronic devices. *2016 4th IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering, SEGE 2016*, 100–105. <https://doi.org/10.1109/SEGE.2016.7589508>

- PLN. 2023. *PLN Segera Gunakan “AMI” Tahun Ini, Meteran Canggih yang Bikin Pelanggan Bisa Monitor Penggunaan Listrik Secara Realtime*. <https://web.pln.co.id/media/siaran-pers/2023/06/pln-segera-gunakan-ami-tahun-ini-meteran-canggih-yang-bikin-pelanggan-bisa-monitor-penggunaan-listrik-secara-realtime>
- Rao, P. M., & Deebak, B. D. 2022. Role of power line communications in the Smart Grid: applications, challenges, and research initiatives. *Sustainable Networks in Smart Grid*, 73–98. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85626-3.00001-6>
- Ruhul Amin, B. M., Hossain, M. J., Anwar, A., & Zaman, S. 2021. Cyber attacks and faults discrimination in intelligent electronic device-based energy management systems. *Electronics (Switzerland)*, 10(6), 1–15. <https://doi.org/10.3390/electronics10060650>
- Siemens. 2024. *Universal Protection Device for LPITs in air and gas-insulated switchgears*.
- Stutvoet, H. n.d. *Intelligent Electronic Device (IED)*. Retrieved February 5, 2024, from <https://www.svri.nl/en/intelligent-electronic-device-ied/>
- US Department of Energy’s Office of Electricity (OE). n.d. *Smart Home: The Smart Grid | SmartGrid.gov*. Retrieved February 9, 2024, from https://www.smartgrid.gov/the_smart_grid/smart_home.html

BAB 6

INTEGRASI KECERDASAN BUATAN DAN INTERNET OF THINGS (IOT) DALAM SISTEM TENAGA LISTRIK

Oleh Leonard Lisapaly

6.1 Pendahuluan

Kecerdasan buatan (*artificial intelligence*) adalah tiruan akal manusia yang ditambahkan ke dalam suatu sistem (misalnya sebuah robot) yang bisa diatur. Kecerdasan buatan didefinisikan sebagai sebuah “kemampuan sistem untuk menafsirkan data eksternal dengan benar, untuk belajar dari data tersebut, dan menggunakan pembelajaran tersebut guna mencapai tujuan dan tugas tertentu melalui adaptasi yang fleksibel” (Kaplan dan Haenlein, 2019).

Konsep kecerdasan buatan pada awalnya antara lain diperkenalkan oleh Alan Turing yang mengajukan konsep bahwa kecerdasan manusia dapat disimulasikan oleh mesin. Kerja yang dilakukan oleh Alan Turing kemudian melahirkan suatu konsep untuk menguji kecerdasan mesin yang disebut Tes Turing (Turing, 1950).

Istilah kecerdasan buatan diperkenalkan pertama kali dalam Konferensi Dartmouth yang menandai lahirnya kecerdasan buatan sebagai sebuah bidang studi (sebagai contoh: Moor, 2006). Bidang ini kemudian semakin berkembang dan sekitar tahun 2000-an muncullah konsep pembelajaran mesin (*machine learning*) dengan menggunakan konsep jaringan saraf (*neural network*). Pembelajaran mesin semakin berkembang dan dibutuhkan seiring dengan tersedianya data untuk dianalisis dalam jumlah yang sangat besar (*big data*) yang ditunjang dengan kemampuan komputer yang semakin canggih baik dalam daya komputasi, memori, maupun penyimpanan (*storage*).

Setelah pembelajaran mesin, pada tahun 2010-an muncullah apa yang disebut pembelajaran mendalam (*deep learning*). Pembelajaran mendalam adalah pembelajaran mesin yang melibatkan jaringan saraf dengan banyak lapisan. Metode ini merupakan terobosan yang penting dalam pengenalan gambar dan ucapan, pemrosesan bahasa alami, dan sistem otonom. Saat ini, penerapan kecerdasan buatan telah tersebar luas di dunia industri seperti perawatan kesehatan, keuangan, transportasi, dan tentunya dunia energi dan kelistrikan. Kecerdasan buatan juga kini dikembangkan pada mobil *self-driving*, asisten virtual seperti Siri dan Alexa yang ada di *smartphone*, dan dan personalisasi pilihan atau rekomendasi pada berbagai platform (misalnya Youtube, Netflix, dan Amazon). Penelitian terus berlanjut di berbagai bidang seperti AI etis, kemampuan menjelaskan, dan AI umum.

Penelitian tentang kecerdasan buatan masih terus berkembang pesat dan menarik untuk diamati perannya dalam kehidupan sehari-hari.

Internet of Things (IoT) adalah sebuah obyek fisik (atau kelompok obyek fisik) yang memiliki sensor, kemampuan pemrosesan, perangkat lunak, dan teknologi lain yang dapat menghubungkan dan melakukan pertukaran data dengan perangkat dan sistem lain melalui internet atau jaringan komunikasi lainnya. IoT saat ini berkembang pesat karena terjadi perkembangan pesat dalam bagian-bagian yang membentuk IoT, yaitu perkembangan komputer, sensor, *embedded system*, dan pembelajaran mesin. Integrasi dari hal-hal tersebut dapat digunakan untuk mengembangkan berbagai bentuk *smart things*.

Smart buildings, *smart grids*, dan *smart cities* adalah beberapa contoh penggunaan IoT dalam skala besar untuk memantau dan mempermudah pengelolaan bangunan modern, jaringan distribusi listrik, maupun perkotaan. Dalam bagian ini kita akan melihat contoh sederhana penggunaan IoT dalam manajemen energi maupun lainnya.

6.2 Kecerdasan Buatan dalam Sistem Tenaga Listrik

Dalam bab ini, kecerdasan buatan dan berbagai algoritma yang digunakan di dalam kecerdasan buatan tidak akan dibahas secara khusus karena telah tersedia banyak bahasan tentang topik ini di dalam jurnal, majalah, maupun sumber-sumber lain yang dapat ditemukan di internet, sebagai contoh dapat dilihat pada tulisan populer oleh Anyoha (2017), West dan Allen (2018), dan Marr (2024), atau tulisan ilmiah seperti yang dilakukan oleh Cao (2017), Haenlein dan Kaplan (2019), dan Gopi dan Williams (2021). Buku ini akan membahas secara singkat penggunaan kecerdasan buatan dalam sistem tenaga listrik seperti misalnya yang ditemukan dalam karya Heymann, *et.al* (2024).

6.2.1 Mengapa Kecerdasan Buatan Digunakan Dalam Ketenagalistrikan

Seerti telah disebutkan sebelumnya, kecerdasan buatan telah merambah masuk ke berbagai bidang termasuk bidang ketenagalistrikan. Listrik diperkirakan akan menutupi lebih dari 50% konsumsi energi akhir pada tahun 2050 sebagai usaha pemenuhan skenario nol bersih (net zero emission) yang dicanangkan oleh negara-negara di dunia melalui apa yang disebut Sustainable Development Goals. (IEA, 2022). Tren saat ini menunjukkan bahwa sistem energi mulai berubah menjadi sistem yang didominasi listrik yang digital. Kecerdasan buatan telah diterapkan dalam sistem tenaga modern seperti: perkiraan energi terbarukan, pengoperasian atau pemantauan mikrogrid, dan pengoperasian sistem tenaga listrik berskala besar (misalnya Lopez-Garcia, *et.al*, 2020 dan Miranda dan Monteiro, 2000). Oleh karena itu, penerapan kecerdasan buatan untuk sistem tenaga perlu diperhatikan dan dikembangkan oleh berbagai kalangan di Indonesia, termasuk oleh pemangku kepentingan penyediaan energi.

Saat ini, penggunaan kecerdasan buatan dapat ditemukan di bidang yang berbeda dalam dunia kelistrikan. Kecerdasan buatan misalnya dapat digunakan untuk meningkatkan operasi sistem energi dan optimasi, perencanaan jaringan listrik, analisis perilaku

konsumen, analisis tarif, analisis beban listrik, peramalan energi terbarukan, dan pembuatan kebijakan.

Dalam dunia kelistrikan, kecerdasan buatan mengandalkan teknologi digital dalam sistem energi dan juga dalam sistem tenaga listrik. Dalam beberapa tahun terakhir, beberapa penelitian tentang penerapan kecerdasan buatan dalam sistem energi telah dipublikasikan. Namun, perlu diperhatikan bahwa kita perlu tetap selektif dalam pemilihan penggunaan kecerdasan buatan dan hasil analisis tidak dapat digunakan untuk menilai suatu kasus secara konklusif karena pemilihan algoritma kecerdasan buatan untuk memberikan hasil yang akurat perlu diuji.

6.2.2 Kecerdasan Buatan dalam Sistem Tenaga

Pada bagian ini akan disajikan contoh penggunaan kecerdasan buatan dalam sistem tenaga untuk menunjukkan potensi penggunaan kecerdasan buatan dalam sistem tenaga. Tabel 1 memperlihatkan variasi potensi penggunaan kecerdasan buatan dalam sistem tenaga yang disederhanakan dari penelitian Heymann, *et.al* (2024).

Tabel 6.2. Potensi Penggunaan Kecerdasan Buatan dalam Sistem Tenaga

Unsur sistem tenaga	Kasus	Aplikasi kecerdasan buatan
Pembangkitan tenaga	Perbaikan perencanaan	• Penempatan dan ukuran generator sistem energi terbarukan (RES)
	Perbaikan O&M	• Deteksi anomali di turbin angin • Optimisasi perawatan generator RES
Jaringan transmisi	Perbaikan perencanaan	• Penempatan dan ukuran aset transmisi • Analisis kelangkaan
	Perbaikan O&M	• <i>Dynamic line rating</i> • <i>Transmission fault protection</i>
	Koordinasi TSO-DSO	• Layanan berbasis kelenturan jadwal

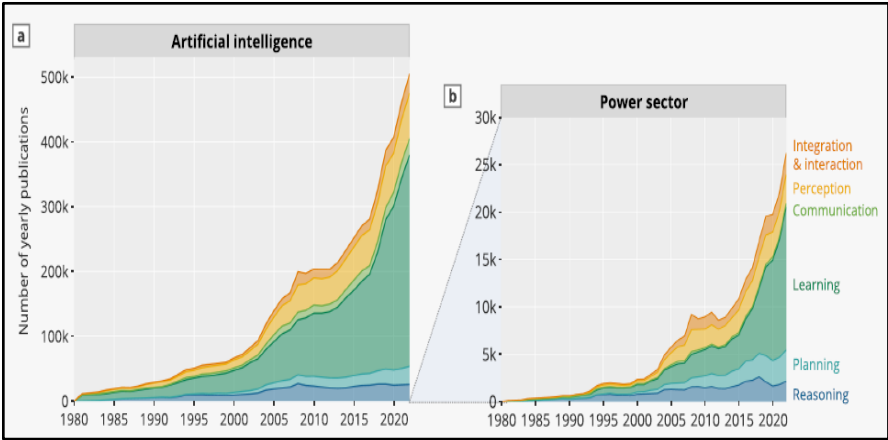
Unsur sistem tenaga	Kasus	Aplikasi kecerdasan buatan
	Otomatisasi grid	• Pengotomatisasian sistem transmisi
Jaringan distribusi	Perbaikan perencanaan	• Routing jalur distribusi • Penempatan substasiun HV/MV
	Perbaikan O&M	• Lokasi <i>fault</i> secara otomatis • Analisis kestabilan
	Otomatisasi grid	• Pengotomatisasian sistem distribusi
<i>Isolated grid/ microgrids</i>	Perbaikan perencanaan	• Penempatan dan ukuran sumber energi terdistribusi • Peramalan pembangkitan • Peramalan penyimpanan energi dan respon permintaan
	Perbaikan O&M	• Pembagian tenaga aktif dan reaktif • Manajemen energi dan kontrol kualitas tenaga • Proteksi dan restorasi <i>fault</i>
	Otomatisasi grid	• Isolasi/rekoneksi otomatis
Operasi pasar/ perdagangan	Peramalan harga	• Peramalan harga listrik • Peramalan kurva pasar residual
	Agregasi dan kelenturan	• Agregasi teroptimisasi dan penawaran permintaan yang lentur
	Komunitas energi/ prosumer/ pasar energi lokal	• Manajemen energi dan penjadwalan sumber dalam komunitas energi
Pengecer	Perbaikan perencanaan	• Peramalan beban listrik • Peramalan DER <i>diffusion</i> dan <i>net-load</i>
	Perbaikan	• Optimisasi permintaan listrik di

Unsur sistem tenaga	Kasus	Aplikasi kecerdasan buatan
	O&M	belakang meter • Memilih tarif listrik optimal per kelompok pelanggan
	Analisis pelanggan/ permintaan/ beban	• Mengelompokkan pelanggan listrik • Mengkarakterisasikan pengadopsi DER

Sumber : Disederhanakan dari Heymann, *et.al* (2024)

Berdasarkan data yang ada, trend jumlah penelitian tentang kecerdasan buatan umum meningkat secara eksponensial, demikian juga dengan trend jumlah penelitian di sektor tenaga. Gambar 6.1 memperlihatkan perbandingan antara keduanya.

Baik Tabel 6.1 maupun Gambar 6.1 memperlihatkan bahwa penggunaan kecerdasan buatan dalam sistem tenaga sudah semakin banyak dan berkembang. Hal ini memperlihatkan bahwa kecerdasan buatan semakin populer karena manfaatnya terutama dalam analisis dan pengotomatisasian dalam sistem tenaga.



Gambar 6.4. Trend jumlah penelitian kecerdasan buatan umum (a) dan jumlah penelitian di sektor tenaga.
(Sumber: Heyman, *et.al*, 2024)

6.3 Internet of Things (IoT) dalam Sistem Tenaga Listrik

Internet of Things (IoT) adalah obyek fisik yang tersambung dengan internet. Objek fisik ini dapat menerima atau mengirimkan data melalui internet. Jika ada sekumpulan obyek fisik dapat tersambung ke internet, maka obyek-obyek fisik ini akan dapat saling bertukar data atau dapat dikendalikan melalui internet. Obyek fisik ini dapat berupa *device* dalam skala kecil, menengah, maupun besar. Kelebihan inilah yang dimanfaatkan untuk memudahkan pengendalian obyek fisik melalui internet, termasuk peralatan listrik dalam skala yang berbeda.

6.3.1 Teknologi Informatika dan Komunikasi

Sebelum kita membahas mengenai penggunaan IoT dalam sistem tenaga, terlebih dahulu kita perlu membahas teknologi informatika dan komunikasi (TIK), karena IoT berbasiskan pada penggunaan internet untuk mengakses informasi yang merupakan salah satu komponen dari TIK.

Kata kunci dalam TIK adalah globalisasi. Globalisasi telah "memaksa" penggunaan teknologi informatika dan komunikasi sesering mungkin dalam berbagai macam fungsi bisnis, ekonomi, sosial, kesehatan, dan lain sebagainya. Dengan visi globalisasi yang ada, TIK telah membuat dunia menjadi sebuah "*global village*" yang memberikan kedekatan antara pengguna TIK. Pada beberapa tahun sebelumnya, komunikasi antara dua orang yang berada pada benua yang berbeda dengan perbedaan jarak yang besar tidak semudah sekarang dimana komunikasi bisa dilakukan seperti "berhadapan muka". Demikian juga informasi yang terjadi di tempat yang jauh dapat dengan mudah kita terima dalam "satu kedipan mata". Tak dapat dihindari, TIK telah menjadi salah satu faktor kunci dalam pengembangan industri jasa di masa depan seperti perbankan, transportasi, logistik, industri ritel, dan tentu saja energi dan kelistrikan.

TIK mulai berkembang karena adanya kebutuhan aliansi militer dan industri pada perang dunia II dalam elektronika, komputer, dan informasi (Schwoch, 2012). TIK merujuk pada penerapan teknologi informasi dan komunikasi terhadap

pembangunan sosial, ekonomi, dan politik, dan didasarkan pada gagasan "pembangunan, pertumbuhan, kemajuan, dan globalisasi".

TIK merujuk pada teknologi yang memberikan akses kepada informasi melalui telekomunikasi yang mencakup internet, jaringan nirkabel, telepon selular, dan media komunikasi lainnya. Alat-alat yang digunakan dalam TIK antara lain program komputer, basis data, jaringan komunikasi, metode analisis dan disain, bahasa pemrograman, kecerdasan buatan, basis pengetahuan, dan lain-lain. Selain membawa perubahan besar dalam ilmu pengetahuan dan informasi, TIK telah memberikan efek yang berarti pada kemajuan dan pengembangan peradaban manusia. TIK berguna untuk menyimpan, mengambil, memanipulasi dan mengirimkan informasi secara elektronik.

Berdasarkan paparan di atas, dapat disimpulkan bahwa TIK adalah penggunaan teknologi berbasis komputer dan internet untuk membuat layanan informasi dan komunikasi tersedia bagi berbagai penggunanya. TIK terdiri dari perangkat keras dan perangkat lunak yang memungkinkan masyarakat membuat, mengumpulkan, mengkonsolidasikan, dan mengkomunikasikan informasi dalam format multimedia dan untuk berbagai tujuan.

TIK memiliki beberapa kelebihan maupun kekurangan. Kelebihan TIK adalah: globalisasi (misalnya *video conference*), hemat biaya (tidak perlu menggunakan telepon konvensional, email gratis, otomatisasi proses bisnis), lebih banyak waktu (*single click* untuk banyak urusan), pekerjaan baru (programmer komputer, pengembang sistem, perangkat keras, dan perangkat lunak, disainer *web*), dan pendidikan (kursus/pelatihan daring, perangkat lunak daring). Kekurangan TIK adalah: *blackmail*, pengangguran, *privacy* (gangguan *hacker*), virus komputer, ketagihan media sosial atau sebaliknya menjadi anti sosial.

6.3.2 Internet of Things (IoT)

Ketika internet mulai berkembang, konsep menyatukan berbagai macam peralatan juga mulai berkembang. Contoh awal dari penggunaan IoT adalah *vending machine* dan anjungan mandiri tunai (ATM). Saat itu, orang tidak lagi perlu mengunjungi bank dan antri di depan kasir untuk melakukan transaksi penarikan tunai, tetapi mereka dapat mengunjungi mesin untuk melakukan

penarikan uang. Seiring dengan perkembangan TIK, kita dapat melakukan setoran uang melalui mesin ATM.

Istilah "*Internet of Things*" diciptakan pada tahun 1999 oleh Kevin Ashton dan mengacu pada sistem dimana internet terhubung ke dunia fisik melalui sensor yang ada dimana-mana (Kramp, *et.al*, 2013). Mulai tahun 2000-an, perkembangan teknologi nirkabel, sistem mikroelektromekanis (MEMS), dan internet menyebabkan berkembangnya perangkat IoT yang lebih canggih. Aplikasi awal berfokus pada *tag* RFID untuk manajemen rantai pasokan dan perangkat rumah pintar.

IoT kemudian berkembang pesat karena didorong oleh kemajuan dalam komunikasi nirkabel, komputasi awan, dan analisis data besar. Perangkat IoT konsumen, seperti termostat pintar, *speaker* pintar, dan pelacak kebugaran yang dapat dikenakan di tangan, menjadi populer.

Industrial IoT (IIoT) juga mendapatkan daya tarik dengan aplikasi di bidang manufaktur, logistik, dan manajemen energi. IIoT memungkinkan pemeliharaan prediktif (*predictive maintenance*), pemantauan waktu nyata (*realtime monitoring*), dan otomatisasi.

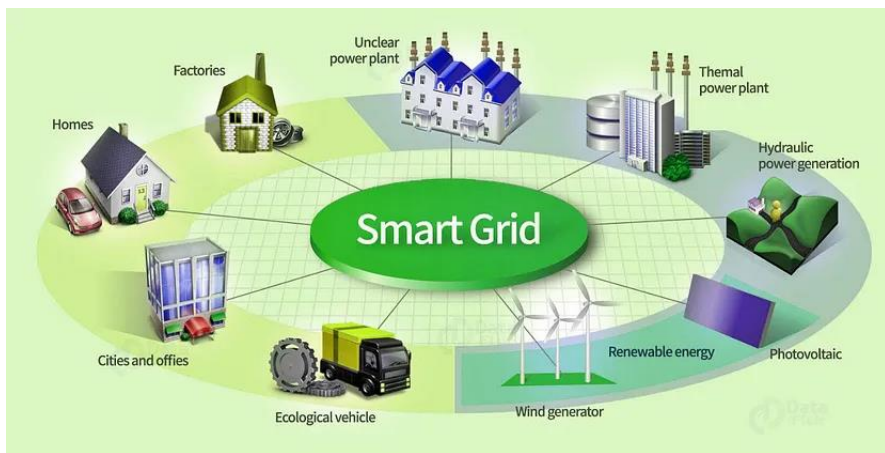
Pada perkembangan terkini, IoT mencakup beragam perangkat yang terhubung, mulai dari peralatan rumah tangga hingga mesin industri, konsep kota pintar, jaringan listrik pintar, dan layanan kesehatan yang terhubung. Keamanan dan interoperabilitas masih menjadi tantangan yang signifikan (salah satu kekurangan TIK adalah *hacker*). Trend masa depan mencakup integrasi kecerdasan buatan (*artificial intelligence/AI*) dengan IoT (AIoT), *edge computing* untuk memproses data lebih dekat dengan tempat data dihasilkan, dan perluasan jaringan 5G untuk meningkatkan konektivitas dan mengurangi keterlambatan.

Sebagai penutup bahasan tentang kecerdasan buatan (AI) dan IOT, saat ini AI dan IoT (AioT) telah berevolusi dari konsep teoritis menjadi komponen integral dari teknologi modern, yang berdampak besar pada berbagai industri dan kehidupan sehari-hari. Sementara AI berfokus pada penciptaan sistem cerdas yang mampu belajar dan mengambil keputusan, IoT menghubungkan perangkat dan memungkinkan mereka berkomunikasi dan berinteraksi, sehingga menghasilkan lingkungan yang lebih cerdas dan proses yang lebih efisien. Kedua bidang tersebut terus berkembang,

didorong oleh kemajuan teknologi dan meningkatnya permintaan akan sistem cerdas dan terhubung. Dengan AIoT, pemanfaatan kecerdasan buatan pada Tabel 1 dapat diintegrasikan dengan IoT sehingga semua hal dapat dilihat melalui *graphical user interface* (GUI) yang ditampilkan pada layar komputer/laptop ataupun *smartphone*.

Gambar 6.5 memperlihatkan sebuah konsep *smart grid* yang merupakan sistem solusi infrastruktur, perangkat keras, dan perangkat lunak yang memungkinkan komunikasi dua arah antara seluruh bagian sistem dan partisipan, serta pembangkitan dan distribusi listrik yang efisien di seluruh rantai pasokan.

Jaringan pintar sering digambarkan sebagai sistem distribusi mandiri. *Smart grid* dapat menghasilkan listrik dari berbagai sumber, termasuk energi terbarukan dan penyimpanan energi. Selain itu, penerapan sistem ini memberikan kemampuan kontrol dan manajemen yang belum pernah ada sebelumnya kepada pemasok dan konsumen. Semuanya dilakukan dengan memanfaatkan kecerdasan buatan dan IoT.

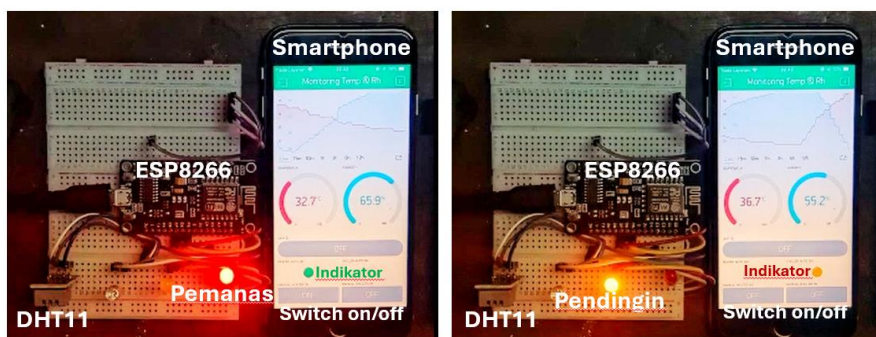


Gambar 6.5. Teknologi *smart grid* dan IoT
(Sumber : Hashstudios Technologies (2021))

6.3.3 Model Mini Kecerdasan Buatan dan IoT

Sebagai penutup dan menambahkan ilustrasi integrasi kecerdasan buatan dan IoT, sebuah contoh sederhana integrasi kecerdasan buatan dan IoT akan diperlihatkan. Dalam model ini,

sebuah alat pemanas ruangan (direpresentasikan oleh sebuah LED) akan dinyalakan jika suhu ruangan yang diukur dengan menggunakan sebuah sensor DHT11 berada di bawah 33°C , dan jika suhu ruangan berada di atas 36°C , sebuah pendingin ruangan (direpresentasikan oleh LED lainnya) akan dinyalakan. Jika suhu ruangan berada di antara 33°C dan 36°C , baik pemanas maupun pendingin ruangan tidak dinyalakan. Di sini dapat kita lihat bahwa "kecerdasan buatan" direpresentasikan secara sederhana dengan menggunakan bentuk "if ... else...", namun dalam kasus yang lebih rumit, pembelajaran mesin dapat digunakan untuk menggantikan proses sederhana tersebut. Untuk mengintegrasikan semuanya, digunakan sebuah perangkat microcontroller yang bernama ESP8266 yang memiliki kemampuan untuk mengambil data dari sensor dan melakukan suatu eksekusi pada perangkat yang tersambung ke ESP8266, serta kemampuan untuk melakukan koneksi dengan internet. Semua proses yang terjadi "dilaporkan" ke dalam sebuah *smartphone* melalui internet, dan jika diperlukan, perangkat yang terkoneksi dapat dimatikan atau dihidupkan melalui *smartphone*. Alat pemanas dan pendingin ruangan dapat dihubungkan dengan sistem dengan menggunakan sebuah *relay*.



Gambar 6.6. Sistem cerdas mini untuk menyalakan alat pemanas jika suhu ruangan di bawah 33°C (kiri), dan menyalakan alat pendingin ruangan jika suhu ruangan di atas 33°C (kanan). Tombol "Switch on/off" dapat digunakan untuk menyalakan atau mematikan perangkat secara manual.
(Sumber: Hidayat, 2023)

Gambar 6.6 memperlihatkan hasil rancangan sistem cerdas manajemen energi sederhana. Jika suhu ruangan lebih kecil dari 33°C , maka pemanas ruangan akan hidup (kiri), dan jika suhu ruangan lebih besar dari 36°C , pendingin ruangan akan hidup (kanan). Jika suhu ruangan berada di antara 33°C dan 36°C , kedua perangkat tersebut tidak beroperasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Andreas Kaplan & Michael Haenlein. 2019. *Siri, Siri, in my hand: Who's the fairest in the land? On the interpretations, illustrations, and implications of artificial intelligence*. Business Horizons, Volume 62, Issue 1, 2019, Pages 15-25, <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2018.08.004>
- A. M. Turing. 1950. *Computing Machinery and Intelligence*. Mind, Volume LIX, Issue 236, October 1950, Pages 433–460, <https://doi.org/10.1093/mind/LIX.236.433>
- J. Moor. 2006. *The Dartmouth College Artificial Intelligence Conference: The Next Fifty years*. AI Magazine, Vol 27, No. 4, pp. 87–89, 2006
- Rockwell Anyoha. 2017. *The History of Artificial Intelligence*. <https://sitn.hms.harvard.edu/flash/2017/history-artificial-intelligence/>
- Darrell M. West & John R. Allen. 2018. *How artificial intelligence is transforming the world*. <https://www.brookings.edu/articles/how-artificial-intelligence-is-transforming-the-world/>
- Bernard Marr. 2024. *The Biggest AI Trends In The Next 10 Years*. <https://bernardmarr.com/the-biggest-ai-trends-in-the-next-10-years/>
- Zheng Cao. 2017. *Development and Application of Artificial Intelligence*. 10.2991/icmeit-17.2017.79.
- Michael Haenlein & Andreas Kaplan. 2019. *A Brief History of Artificial Intelligence: On the Past, Present, and Future of Artificial Intelligence*. California Management Review. 61. 000812561986492. 10.1177/0008125619864925.
- J. Gopi & R. Williams. 2021. *Emergence of Artificial Intelligence and Its Role in Promoting New Products and Services*. Asian Journal of Economics, Finance and Management, 3(1), 309–314. Retrieved.
- F. Heymann, H. Quest, T. Lopez Garcia, C. Ballif, & M. Galus. 2024. Reviewing 40 years of artificial intelligence applied to power systems – A taxonomic perspective, Energy and AI, Volume 15, 2024, 100322, ISSN 2666-5468,

- <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2023.100322>.
- IEA. 2022. *World Energy Outlook 2022 – Analysis*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>.
- T.B. Lopez-Garcia, A. Coronado-Mendoza, J.A. Domínguez-Navarro. 2020. *Artificial neural networks in microgrids: a review*. Eng Appl Artif Intell 2020;95:103894. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2020.103894>.
- V. Miranda & C. Monteiro. 2000. *Fuzzy inference in spatial load forecasting*. Proceedings of the 2000 IEEE power engineering society winter meeting. Conference (Cat. No.00CH37077). 2; 2000. p. 1063–8. <https://doi.org/10.1109/PESW.2000.850087>.
- James Schwoch. 2012. *World War II and Communication Technologies*. A Companion to World War II. 1. 477-481. 10.1002/9781118325018.ch29.
- Thorsten Kramp, Rob Kranenburg & Sebastian Lange. 2013. *Introduction to the Internet of Things*. 10.1007/978-3-642-40403-0_1.
- HashStudioz Technologies. 2021. *The Role of Internet of Things (IoT) in Smart Grid Technology and Applications*. <https://hashstudioz.medium.com/the-role-of-internet-of-things-iot-in-smart-grid-technology-and-applications-86061ad17f53>
- Rifan Hidayat. 2023. *Proyek Manajemen Energi Berbasis IoT*. Laporan Tugas Proyek, Program Studi Magister Teknik Elektro, Universitas Kristen Indonesia.

BAB 7

KENDALI OPTIMAL TEKNOLOGI PENYIMPANAN ENERGI

Oleh Zainal Abidin

7.1 Pendahuluan

Perkembangan teknologi dalam dekade terakhir mengalami kemajuan yang sangat pesat, integrasi antar bidang ilmu pengetahuan dalam mensupport aplikasi teknologi menghasilkan produk-produk baru yang sangat bermanfaat bagi kehidupan manusia dalam segala bidang energi, bidang telekomunikasi, kedokteran, elektronika, sistem tenaga listrik, transportasi, militer, antariksa, dan lain-lain.

Kecerdasan buatan (*artificial intelegence*) semakin masif dimanfaatkan dalam desain, pengendalian maupun optimasi produk teknologi. Salah satu yang akan kita bahas dalam makalah ini adalah kecerdasan buatan dalam bidang energi, terutama penyimpanan energi. Dengan menggunakan kecerdasan buatan untuk menganalisis data percobaan dan simulasi, kita dapat mengidentifikasi solusi yang lebih efisien dan berkelanjutan dalam waktu yang lebih singkat.

Pemanfaatan *Artificial Intelegence* (AI) dalam mengoptimalkan energi terbarukan membawa banyak manfaat, termasuk mengurangi emisi karbon, meningkatkan efisiensi energi, dan mempercepat peralihan menuju sumber energi yang lebih berkelanjutan. Dalam perkembangan teknologi berbasis AI, terdapat tantangan termasuk masalah privasi data, keamanan, dan etika dalam penggunaan teknologi ini. Oleh karena itu, peran AI dalam energi terbarukan harus dikelola dengan bijak demi mencapai masa depan yang lebih bersih dan berkelanjutan.

7.2 Teknologi Penyimpanan Energi

Definisi penyimpanan energi dapat mencakup sistem untuk menyediakan listrik atau cadangan energi bagi masyarakat lokal,

menggabungkan tenaga surya, dan menyediakan penyimpanan energi untuk menghasilkan tenaga listrik yang andal. Beberapa sistem penyimpanan bersifat berdiri sendiri, sementara yang lain terintegrasi dengan sumber daya energi terdistribusi. Karena pembangkitan tenaga surya bervariasi sepanjang hari, sistem penyimpanan dapat menghidupkan dan mematikan daya sesuai kebutuhan untuk menghindari pemadaman jaringan listrik. Selain itu, sistem agregat dapat melayani komunitas dan menyalurkan energi ke beberapa rumah pada waktu berbeda sepanjang hari.

Teknologi penyimpanan energi dari berbagai teknologi penyimpanan energi mulai jangka pendek dan jangka panjang memungkinkan kita menghemat energi dalam jumlah besar dalam periode berbeda. Sejak penemuan listrik, metode efektif untuk menyimpan energi menjadi bahan diskusi dan juga riset. Seiring kemajuan teknologi dan perubahan permintaan energi, industri penyimpanan energi terus berkembang, beradaptasi, dan berinovasi. Sistem penyimpanan energi menyediakan serangkaian pendekatan teknologi untuk mengelola pasokan listrik kita. Tujuannya adalah untuk menciptakan infrastruktur energi yang lebih tangguh dan menghemat biaya bagi utilitas dan konsumen. Berikut beberapa cara penyimpanan energi saat ini:

1. *Baterai* – serangkaian solusi penyimpanan elektrokimia, termasuk baterai kimia canggih, baterai aliran, dan kapasitor
2. *Termal* – menangkap panas dan dingin untuk menghasilkan energi sesuai permintaan atau mengimbangi kebutuhan energi
3. *Penyimpanan Mekanis (Mechanical storage)*– teknologi inovatif lainnya untuk memanfaatkan energi kinetik atau gravitasi untuk menyimpan listrik
4. *Hidrogen* – kelebihan pembangkitan listrik dapat diubah menjadi hidrogen melalui elektrolisis dan disimpan
5. *Pumped Hidropower*– menciptakan cadangan energi berskala besar dengan air
6. *Roda gila (Flywheels)*– motor listrik digunakan untuk memutar roda atau rotor untuk menyimpan energi. Energi tersebut kemudian dibuang oleh generator listrik, sehingga memutar roda gila

7. Penyimpanan energi udara bertekanan – udara bertekanan digunakan untuk menciptakan cadangan energi yang kuat.

Beberapa teknologi tersebut merupakan sistem yang canggih yang dapat menyimpan dan melepaskan energi, namun beberapa teknologi memiliki kekurangan yaitu :

1. Tidak dapat mengoptimalkan operasionalnya dengan mengontrol waktu pengisian dan pengosongan listrik sesuai dengan harga listrik
2. Tidak mampu melakukan kontrol bagaimana dan kapan baterai diisi dayanya setiap hari untuk mencapai masa pakai yang lebih lama
3. Tidak mampu mengkoordinasikan operasi mereka dengan solusi penyimpanan energi lainnya, kapasitas pembangkit listrik, dan konsumen
4. Tidak bisa memprediksi kapan kegagalan akan terjadi dan bertindak sebelum hal itu terjadi.

Maka peranan AI dalam melengkapi dan meningkatkan optimasi peran teknologi semakin dibutuhkan.

7.3 Peranan Kecerdasan Buatan dalam Produksi dan Penyimpanan Energi

Munculnya kecerdasan buatan (*artificial intelegence*) telah memungkinkan otomatisasi area produksi dan penyimpanan yang luas di industri energi. Jaringan listrik menggunakan AI untuk bekerja lebih cerdas dan cepat, mengumpulkan data dari meteran cerdas, catatan bisnis, prakiraan cuaca, dan lain-lain. Algoritma pembelajaran mesin kemudian dapat memproses informasi ini dan mengoptimalkan kinerja jaringan listrik untuk efisiensi yang lebih besar. AI juga memberikan banyak manfaat bagi produsen. Misalnya, AI dapat mengoptimalkan desain pabrik untuk efisiensi dan output maksimum. Hal ini dapat meningkatkan kinerja sumber energi baru terbarukan seperti panel surya atau turbin angin, sehingga mengurangi kebutuhan pemeliharaan dengan analisis prediktif. Sistem tenaga listrik juga dapat menggunakan AI untuk memprediksi kesalahan sebelum terjadi.

7.4 Bagaimana AI bekerja

Sejumlah besar data yang mudah diakses, terstruktur dengan baik, dan akurat terdapat di sektor energi, sehingga ideal untuk berbagai aplikasi kecerdasan buatan (AI). Data yang dimasukkan ke dalam sistem AI dapat memberikan hasil yang sangat bermanfaat bagi solusi penyimpanan energi terutama dalam hal :

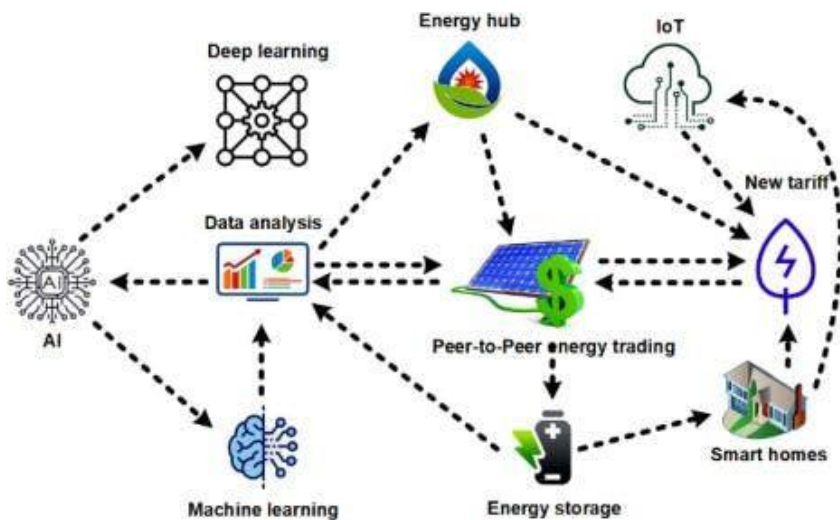
1. ***Perkiraan permintaan dan pembangkitan:*** AI memperkirakan pembangkitan dan permintaan listrik serta harga pada titik waktu tertentu dengan mempertimbangkan berbagai sumber data, seperti data historis listrik dan cuaca selama bertahun-tahun. Prakiraan yang akurat mendukung pengoperasian jaringan listrik yang aman dan andal dengan menyeimbangkan pasokan dan permintaan listrik. Peramalan juga secara signifikan meningkatkan efisiensi operasional solusi penyimpanan energi.
2. ***Prakiraan angin dan matahari:*** Prakiraan angin dan matahari sangat penting dalam mengurangi ketidakpastian yang terkait dengan pembangkitan energi terbarukan; penyaluran energi terjadwal lebih bernilai bagi jaringan listrik dibandingkan penyaluran energi standar yang tidak berbasis waktu. Menggunakan energi tersebut bisa jadi sulit karena kemampuan produksi dan penyimpanan energi terus berubah setiap hari. AI memanfaatkan data cuaca dan satelit untuk mengembangkan prakiraan energi terbarukan, ditambah pemodelan dan analisis statistik. Banyak solusi penyimpanan energi diterapkan untuk mengimbangi ketidakpastian tenaga angin dan pembangkit listrik tenaga surya, sehingga prediksi yang akurat sangatlah penting.
3. ***Pemeliharaan prediktif:*** AI mendeteksi anomali di berbagai subsistem kelistrikan, elektro-mekanis, kimia, dan termal sebelum menyebabkan kerusakan pada sistem, sehingga memungkinkan operator untuk bertindak tepat waktu. Ia melakukannya dengan mengumpulkan data dari lingkungan dan sensor yang berbeda. Data ini digunakan untuk melatih model pembelajaran mesin canggih yang mampu mendeteksi kondisi yang biasanya menyebabkan

kegagalan komponen tertentu. Pemeliharaan prediktif mengurangi waktu henti, meningkatkan umur operasional sistem penyimpanan, mencegah kerusakan, dan meningkatkan keuntungan bagi operator. Masa depan energi Perusahaan di industri energi menggunakan AI untuk memproses dan menganalisis data dengan lebih cepat dan dengan lebih sedikit campur tangan manusia. Artinya, mereka dapat bereaksi terhadap perkembangan baru (seperti pemadaman listrik mendadak) jauh lebih cepat dibandingkan sebelumnya.

Perkembangan baru ini berarti penghematan bagi sisi produksi industri dan peningkatan keselamatan bagi konsumen. Karena AI tertanam dalam jaringan listrik di seluruh dunia, AI akan mengantisipasi potensi masalah dan memastikan masalah tersebut tidak terjadi (misalnya dengan mematikan jaringan listrik secara otomatis).

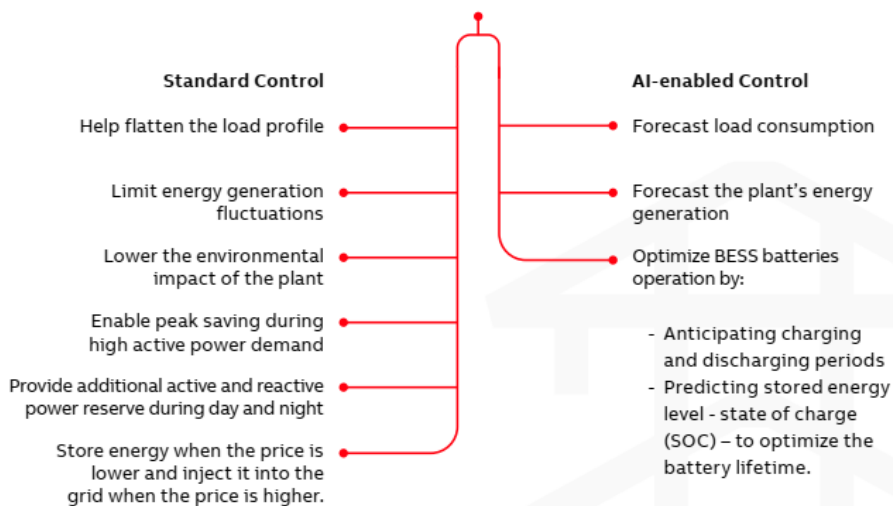
Kecerdasan buatan telah mengubah jaringan listrik pintar (*smart grid*) menjadi benar-benar cerdas, sehingga memungkinkan mereka memenuhi kebutuhan energi di masa depan. Ketika penyimpanan energi semakin menjadi bagian integral dari jaringan pintar, AI akan merevolusi pemahaman kita tentang pola konsumsi, memungkinkan operator jaringan listrik untuk mengoperasikan aset mereka dengan lebih baik guna meningkatkan pendapatan. AI adalah teknologi disruptif yang berpotensi mengubah cara kita hidup, bekerja, dan berinteraksi secara radikal. Industri energi juga tidak terkecuali dalam tren ini.

AI berpotensi mengubah cara kita memproduksi dan menyimpan energi dalam berbagai cara. Masa depan energi mungkin terlihat sangat berbeda dari apa yang kita ketahui sejauh ini. Namun satu hal yang pasti: AI akan memainkan peran penting dalam membentuk masa depan tersebut. Seperti yang diperlihatkan pada gambar 1 berikut :



Gambar 7.1. Aplikasi AI dalam Teknologi Penyimpanan Energi
Sumber : Sciencedirect

BESS integrated with renewable power plant



Gambar 7.2. Standar Sistem Penyimpanan Energi Baterai (BESS) dan optimisasi dengan AI (sumber : ABB)

Gambar 7.2, merupakan skema proses sistem penyimpanan energi baterai dengan variabel-variabel yang dapat dilakukan pengontrolan.

7.5 Aplikasi Artificial Intelligence dalam Penyimpanan Energi

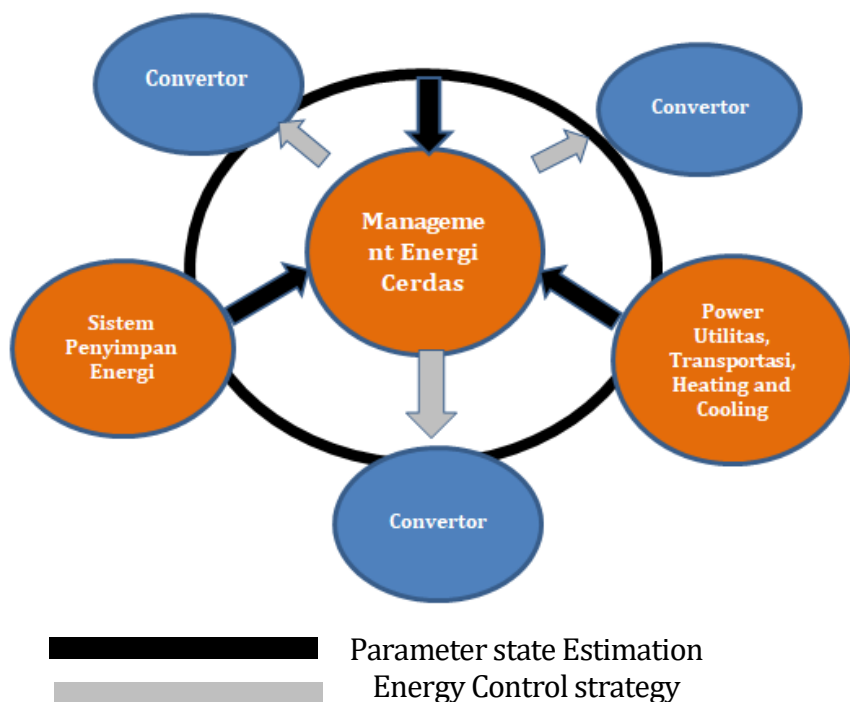
Dewasa ini untuk kepentingan yang lebih besar, kebutuhan AI (*Artificial Intelligence*) semakin dibutuhkan dalam teknologi penyimpanan energi. AI mendorong penggunaan energi terbarukan dan mengoptimalkan (*optimization*) untuk mendapatkan udara yang lebih bersih, biaya energi yang lebih rendah, dan sebagainya. Perangkat lunak Smart BESS (*Battery Energy Storage System*) memudahkan penggunaan energi ramah lingkungan, menyederhanakan perawatan, dan meningkatkan masa pakai baterai.

Sangat penting sekali bahwa sektor energi modern memerlukan solusi perangkat lunak yang canggih, dalam hal ini tidak hanya tentang AI. Secara keseluruhan, AI dapat diperkenalkan ke beberapa aplikasi monolitik. Namun jika Anda memilih untuk membangun struktur monolitik, bersiaplah menghadapi masalah dengan manajemen dan penskalaan platform sejak awal. Pendekatan cloud-native adalah hal yang Anda perlukan untuk perangkat lunak yang kuat dan skalabel yang dapat menghadirkan teknologi canggih seperti AI ke pasar.

7.6 Peran Kecerdasan Buatan dalam Sektor Energi

Para peneliti telah memperkenalkan banyak algoritma dan metode untuk pemodelan optimasi, estimasi keadaan, dan ekspresi perilaku untuk integrasi energi terbarukan dan ESS. Hal ini dapat diringkas menjadi tiga aspek, seperti yang ditunjukkan pada gambar 3 berikut :





Gambar 7.3. Aplikasi Teknologi AI pada Integrasi Energi Baru Terbarukan dan Sistem Penyimpanan Energi

Dari gambar 7.3 di atas, Kecerdasan buatan secara global berperan dalam konfigurasi sistem optimasi, strategi kontrol energi dan estimasi konfigurasi optimasi sistem, *strategi kontrol energi*, dan *estimasi status parameter*.

1. **Konfigurasi Optimasi Sistem**

Optimasi sistem ini bertujuan untuk menentukan konfigurasi baterai dan ultrakapasitor yang optimal dengan mempertimbangkan korelasi algoritma manajemen energi dengan pencocokan daya selama pengoperasian perangkat, serta optimalisasi gabungan algoritma pencocokan daya dan manajemen energi. Algoritma Particle Swarm Optimization (PSO), algoritma pencarian Harmoni, optimasi koloni lebah buatan, dan metode optimasi hibrida banyak digunakan.

2. *Strategi Kontrol Energi*

Bentuk pekerjaan ini berfokus pada pengembangan mekanisme manajemen yang efektif dan cerdas untuk meningkatkan ketahanan dan keandalan ESS, serta kemampuan adaptasi sistem kendali dalam kondisi operasional yang dinamis. Strategi pengendalian hybrid ESS (HESS) penting untuk meningkatkan penggunaan sumber daya dan efisiensi energi. Teknik pemantauannya biasanya rumit dan harus bekerja terus-menerus karena sumber energi terbarukan bersifat terputus-putus dan harus mencapai berbagai tujuan. Metode yang banyak digunakan termasuk pemrograman dinamis, variabel kontrol, kontrol sistem inferensi neuro-fuzzy adaptif, dan kontrol prediktif.

3. *Estimasi Status Parameter*

Jenis penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan metode presisi tinggi, adaptif, dan kuat untuk identifikasi sistem dan penilaian negara. Selain itu, hal ini digunakan untuk mempelajari pengaruh faktor tegangan pada bahan elektroda dan elektrolit dari perspektif elektrokimia atau ilmu material dan hukum penuaan pasokan listrik berdasarkan analisis sinyal dan fitur perilaku termal dan listrik, sehingga dapat menyelidiki hubungan antara faktor stres dan mekanisme penuaan. Pendekatan yang paling populer mencakup jaringan saraf dan filter Bayesian.

4. *Konfigurasi Sistem Optimasi*

Secara khusus, indikator evaluasi (keandalan, ekonomi, dan lingkungan) digunakan untuk menentukan ukuran setiap komponen sistem energi terbarukan hibrid. Selain itu, diperlukan lebih banyak perhatian untuk memahami status terkini dan trend perkembangan ukuran optimal sistem energi terbarukan hibrida. Turunan penting dari sistem tenaga listrik adalah manajemen sisi permintaan. Jika ESS dipadukan dengan respons permintaan dan dimanfaatkan sepenuhnya, pola konsumsi energi RES (*Renewable Energy System*) dapat lebih dioptimalkan.

Banyak penelitian yang mempunyai indikator berbeda untuk mengevaluasi kinerja ESS. Misalnya, penyimpanan energi elektrokimia terutama dianalisis dari sudut pandang efisiensi sistem dan masa pakai baterai. Indikator masa pakai baterai mencakup arus pengisian maksimum baterai, arus pengosongan maksimum, dan arus kuadrat rata-rata. Indikator efisiensi sistem baterai mencakup konverter daya dan kehilangan energi sistem. Selain itu, untuk optimalisasi kapasitas RES dan ESS, algoritme pengoptimalan yang umum mencakup algoritme PSO, algoritme genetika, dan algoritme genetika penyortiran non-dominasi yang ditingkatkan, dan peneliti dapat memilih algoritme sesuai dengan situasi aktual dari contoh penghitungan dan karakteristiknya. dari algoritma itu sendiri. Selidiki kekuatan dan kekurangan metode berbasis kecerdasan buatan yang ada untuk membangun sistem energi. Algoritma PSO memiliki struktur yang sederhana, konvergensi yang cepat, implementasi yang mudah, dan kecerdasan yang baik. Tabel 1 mengulas pekerjaan penting di bidang ini dalam hal algoritma optimasi, jenis penyimpanan, RES, dan indikator evaluasi utama.

Tabel 7.1. Perkembangan riset AI pada optimasi Penyimpanan Energi

Teknik AI	Tipe Energi Penyimpanan	Energi Terbarukan	Faktor	Keterangan
Agglomerative Hierarchi Clustering Algorithm	Baterai	Solar, Turbin Angin	Waktu	Diajukan <i>Agglomerative Hierarchi Clustering Algorithm</i> untuk optimisasi integrasi Solar dan Turbin Angin dengan baterai. Hasil menunjukkan waktu
Non-dominated sorting GA	Pumped storage, battery	Solar, Wind	Biaya dan Emisi	Optimasi algoritma GA untuk integrasi PV, turbin angin, pumped-storage

Teknik AI	Tipe Energi Penyimpanan	Energi Terbarukan	Faktor	Keterangan
				dalam performa sistem ekonomi dan lingkungan
PSO	Baterai dan Hydrogen	PV, Wind	Biaya, efisiensi dan usia pemakaian	Algoritma PSO diimplementasikan pada manajemen energi untuk mengurangi biaya operasi (29,36%) dan menaikkan efisiensi (27,21%) dan mempengaruhi usia pemakaian peralatan (43,43%).
PSO	Baterai, energi panas	PV, Wind	Daya Output	Diajukan algoritma PSO pada multi objek optimisasi daya , dalam upaya meningkatkan kemampuan dan stabilitas saluran transmisi PV, jaringan penyimpanan energi panas, baterai PV dan sistem Hidro-photovoltaik.
Hybrid PSO dan Teaching Learning	Baterai	Wind	Emisi, waktu dan biaya	Disarankan optimasi multi-target yang kuat berdasarkan pendekatan optimasi minimum untuk menyelesaikan kompleksitas REG. Hasil numerik menunjukkan bahwa model pengiriman multi-target yang fleksibel memenuhi tuntutan

Teknik AI	Tipe Energi Penyimpanan	Energi Terbarukan	Faktor	Keterangan
				solusi ketika mempertimbangkan ketidakstabilan turbin angin. Sementara itu, temuan serupa menunjukkan keberhasilan metode PSO-TLBO dalam mengatasi permasalahan pengiriman yang disarankan.
Harmony Search Optimization	Baterai	PV	Time-of-use pricing	Dalam kasus fasilitas pembangkit energi terbarukan seperti angin dan matahari, algoritma harmoni diusulkan untuk menemukan penjadwalan ESS yang optimal pada tingkat waktu penggunaan bebas permintaan. Penelitian terkonsentrasi pada penjadwalan ESS untuk konsumen ritel sistem pembangkitan PV dengan strategi penetapan harga energi yang sama.
PSO	Electrochemical Energy Storage	PV	Power output	Pastikan sistem penyimpanan energi tidak kewalahan dan dibongkar. Kedua, fluktuasi tegangan setelah penyambungan

Teknik AI	Tipe Energi Penyimpanan	Energi Terbarukan	Faktor	Keterangan
				pembangkit listrik penyimpanan energi elektrokimia dengan perhitungan aliran daya dan kompensasi daya reaktif diskrit pada jalur bus untuk penyesuaian fluktuasi tegangan lebih lanjut.
Hybrid GA dan ANN	Baterai	PV	Cost, power output	Formula ANN/ GA untuk ukuran spektrum matahari yang optimal dan daya baterai untuk memenuhi permintaan beban. Biaya modal rata-rata perangkat penyimpanan energi harus minimum dan stabilitas sistem (biasanya dihitung sebagai probabilitas kegagalan beban) harus sesuai.
Bee Colony Algorithm , PSO	Fuel Cell	PV, Wind	Power loss, voltage stability index, and emissions	Temuan yang diperoleh dengan algoritma koloni lebah buatan dengan banyak tujuan memiliki konsistensi yang cukup dan variasi yang lebih besar dibandingkan dengan proses PSO yang diperbarui

7.7 Strategi Kontrol Energi

Penyimpanan energi memiliki keuntungan dari pengaturan daya dua arah, yaitu dapat menyerap daya ketika energi terbarukan mengalami surplus, dan melepaskan daya ketika daya yang disediakan tidak mencukupi. Saat ini, telah banyak digunakan dalam pembangkit listrik tenaga angin tambahan yang terhubung ke jaringan. kontrol pendakian daya. Untuk ladang angin besar, ESS terhubung ke titik sambungan jaringan ladang angin, dan daya pengisian dan pengosongan penyimpanan energi disesuaikan secara dinamis sesuai dengan strategi pengendalian, sehingga daya sambungan jaringan ladang angin memenuhi pendakian secara efisien batas indeks.

Banyak strategi pengendalian yang ada untuk pengendalian tenaga angin berbantuan penyimpanan energi, termasuk penyaringan orde pertama, pembatas kemiringan, dan kontrol prediktif model. Dalam mengembangkan algoritma optimasi heuristik untuk memaksimalkan keuntungan ekonomi dari integrasi RES (*Renewable Energy System*) dan pembangkit listrik termal dengan penyimpanan yang dipompa untuk mengurangi dampak yang terkait dengan emisi dan ketidakpastian lingkungan.

Metode pengendalian pendakian tenaga angin berbantuan penyimpanan energi didasarkan pada pembatas kemiringan, yang membatasi laju perubahan daya yang terhubung ke jaringan tenaga angin hingga dalam kisaran tertentu. Ketika laju kenaikan tenaga angin melebihi kemiringan ini, lebih banyak atau lebih sedikit tenaga angin yang disimpan atau dilepaskan oleh penyimpan energi. Algoritme penyaringan wavelet memiliki nilai aplikasi yang baik untuk pendakian listrik yang terhubung dengan jaringan tenaga angin yang dibantu penyimpanan energi hibrida.

Pada dasarnya, sinyal kesalahan prakiraan sisa dianalisis untuk mengoptimalkan unit penyimpanan energi skala jaringan dengan tenaga angin dan mengurangi tumpahan angin menggunakan metode transformasi wavelet diskrit. Ini membagi daya yang memerlukan kompensasi penyimpanan energi menjadi bagian frekuensi tinggi dan frekuensi rendah melalui analisis wavelet tenaga angin secara real-time, dan kemudian menetapkan perintah daya dari bagian frekuensi tinggi ke kapasitor super, dan

bagian frekuensi rendah. bagian frekuensi ke baterai lithium. Sebuah model algoritma kontrol prediktif berdasarkan indikator evaluasi faktor penalti kekasaran juga telah diusulkan; ini mencapai indikator batas pendakian skala waktu ganda, sekaligus meningkatkan kelancaran tenaga angin dari listrik yang terhubung ke jaringan dan mengurangi kapasitas penyimpanan energi. Pada tahun 2017, strategi pengendalian optimal diusulkan untuk ESS hibrida, yang bertujuan untuk meningkatkan kapasitas pembangkit listrik dari rencana pelacakan tenaga angin. Strategi ini mencakup dua bagian: kendali koordinasi energi internal dan kendali optimalisasi multi-tujuan, serta menggunakan metode kendali yang sesuai dalam status pengisian ESS yang berbeda untuk mencapai kendali pelacakan yang optimal. Dalam modulasi frekuensi cepat dan penekanan osilasi frekuensi ultra-rendah, strategi pengendalian penyimpanan energi akan mempengaruhi permintaan kapasitas penyimpanan energi dan efek pengendalian.

Oleh karena itu, sesuai dengan karakteristik masalah stabilitas frekuensi yang berbeda, perlu dirancang strategi pengendalian yang masuk akal untuk penyimpanan energi, memungkinkan modulasi frekuensi cepat dan menekan osilasi frekuensi sangat rendah; hal ini kondusif untuk meningkatkan keekonomian teknis penyimpanan energi, dan untuk meningkatkan kemampuan modulasi frekuensi sistem tenaga. Pada tahun 2017, metode kontrol optimasi penyimpanan energi berdasarkan prediksi kejadian pendakian tenaga angin digunakan untuk mengklasifikasikan skenario pendakian. Kemudian strategi logika fuzzy digunakan untuk menyesuaikan secara dinamis pendakian listrik yang terhubung ke jaringan untuk skenario pendakian yang berbeda. Pada saat yang sama, koefisien bobot fungsi tujuan disesuaikan secara *real-time* untuk mendapatkan efek pelacakan rencana pembangkit listrik PV terbaik, sesuai dengan daya yang terhubung ke jaringan dan deviasi minimum dari rencana pembangkit listrik, dan dengan memperkenalkan kontrol fuzzy.

Dalam mengoptimalkan tingkat keandalan dan biaya operasi untuk manajemen daya mekanisme penyimpanan menggunakan pengontrol logika fuzzy. Sistem tenaga hijau hibrida yang terdiri dari turbin angin, pengumpul fotovoltaik terintegrasi dengan sistem penyimpanan daya termasuk tumpukan baterai, superkapasitor,

tangki hidrogen, dan sel bahan bakar. Tabel 2 memperkenalkan karya-karya penting dalam hal strategi pengendalian, dan temuan utama.

Tabel 7.2. Beberapa data riset terakhir tentang AI pada sistem kontrol penyimpanan energi

Metode	Hasil /Temuan
Hybrid differential evolution optimization and ANN	Pada jaringan daya yang terdiri dari generator sinkron, daya fotovoltaiik, dan sistem penyimpanan daya baterai, efektivitas pengontrol yang diusulkan ini divalidasi. Parameter pengontrol disesuaikan secara online dengan melatih ANN dengan kumpulan data yang dibuat selama fase optimalisasi keduanya. pengontrol menggunakan DEO dengan gangguan rendah dan tinggi.
Fuzzy Logic controller	Kemampuan keanggotaan FLC dirancang untuk memitigasi biaya operasional sistem hibrida energi hijau berdasarkan prediksi data mingguan dan reguler untuk parameter air, listrik, dan lingkungan, termasuk kecepatan angin, algoritma pengocokan sinar matahari. Penghitungan biaya jaringan listrik telah dilaporkan memiliki dampak yang signifikan terhadap efisiensi komponen penyimpanan energi untuk layanan jaringan HRES karena konfigurasi FLC mingguan dan frekuensi tinggi meminimalkan jam pengoperasian sel bahan bakar dan gas listrik serta variabilitas SOC yang lebih sedikit pada baterai.
PSO	Sistem kontrol ESS baru dengan konfigurasi multi-agen diperkenalkan dengan daya 100 megawatt, dan efek kontrol dikonfirmasi berdasarkan analisis simulasi dan pengujian
ANN and Dynamic	Aliran daya ESS diseimbangkan dengan

Metode	Hasil /Temuan
programming	meminimalkan kehilangan daya dan meningkatkan masa pakai baterai dengan meminimalkan volume dan variasi arus baterai.
Polyline Fuzzy Neural Network	Dalam hal frekuensi yang sesuai, definisi inersia penyimpanan angin luas dievaluasi. Pendekatan PFNN menyarankan penyesuaian frekuensi frekuensi sebagai masukan perangkat penyimpan energi dan status sebagai keluaran.
Hierarchical Control	melalui pengaturan keseimbangan, impedansi yang disimulasikan diseimbangkan secara dinamis untuk menghilangkan pengaruh impedansi saluran yang salah pada ketepatan bagian arus. Kemudian setiap unit penyimpanan daya dapat menyesuaikan arus dengan kesalahan SoC, dan secara bertahap melakukan keseimbangan DESU SoC selama pemuatan dan pengosongan.
FBC and ANN	Jaringan saraf tiruan diusulkan untuk mengelola baterai SOC dalam jangkauan operasi sistem angin/PV gabungan. Selain itu, FBC menjaga arus baterai dan tegangan DC tetap lancar.
FLC/ GA	FLC/GA merekomendasikan agar produksi tenaga angin berfluktuasi sesuai permintaan energi. Konfigurasi FLC/GA menurunkan fluktuasi tegangan sebesar 43,46%.
FLC	FLC merekomendasikan penggunaan hibrida turbin angin dan PV untuk menyimpan listrik baterai, tergantung pada biaya penggunaan. Program yang disarankan mengurangi penghematan keseluruhan dari pendekatan konvensional sebesar 13%.

Metode	Hasil /Temuan
FLC/ ANN	Sistem ANFIS untuk mengendalikan angin hibrida dan PV untuk penyimpanan energi baterai dan hidrogen dengan mempertimbangkan efisiensi sistem. Efisiensi sistem meningkat masing-masing sebesar 0,6 % dan 0,4% untuk baterai dan baterai hibrida/hidrogen.
ANN	ANN mengontrol hibrid turbin angin dan PV untuk penyimpanan energi baterai dan hidrogen dengan mempertimbangkan respons sistem. ANN yang diusulkan memiliki kemampuan respon yang lebih cepat dibandingkan dengan pengontrol logika fuzzy.
FLC/ PSO	Algoritma FLC/PSO untuk mengendalikan energi angin dengan baterai dan penyimpanan energi hidrogen dengan mempertimbangkan biaya operasional dan SOC baterai. Biaya pengoperasian mingguan sistem yang diusulkan berkurang sebesar 18,72% dan SOC baterai meningkat sebesar 16,89
ANN	Metode yang diusulkan berdasarkan pendekatan ukuran dan kontrol untuk sistem penyimpanan energi baterai aliran yang terintegrasi dengan ladang angin besar (turbin angin). Hasilnya menunjukkan bahwa strategi pengendalian aliran daya mempunyai dampak penting pada penentuan ukuran daya dan energi sistem yang tepat[1], [2], [10], [11], [2]-[9]

Dari pemaparan tentang aplikasi AI dalam teknologi kontrol penyimpanan energi yang telah dilakukan oleh para periset dan ilmuwan dapat disimpulkan bahwa teknologi kecerdasan buatan diharapkan mampu untuk :

1. Mengoptimalkan operasional sistem penyimpanan energi dengan mengontrol waktu pengisian dan pengosongan listrik.
2. Mampu melakukan kontrol bagaimana dan kapan baterai diisi dayanya setiap hari untuk mencapai masa pakai yang lebih lama
3. Mampu mengkoordinasikan sistem operasi dengan solusi penyimpanan energi lainnya, kapasitas pembangkit listrik, dan konsumen
4. Mampu memprediksi kapan kegagalan akan terjadi dan bertindak sebelum hal itu terjadi.

DAFTAR PUSTAKA

- A. N. Abdalla *et al.*, "Integration of energy storage system and renewable energy sources based on artificial intelligence: An overview," *J. Energy Storage*, vol. 40, no. April 2021, p. 102811, 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.102811.
- E. O. Ajayi *et al.*, "We are IntechOpen , the world ' s leading publisher of Open Access books Built by scientists , for scientists TOP 1 %," *Intech*, vol. 11, no. tourism, p. 13, 2016, [Online]. Available: <https://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics>
- A. Alhamali, M. E. Farrag, G. Bevan, and D. M. Hepburn, "Genetic algorithm for optimal battery storage system capacity and site selection for distribution network with a high penetration of wind energy," *Int. J. Ind. Electron. Electr. Eng.*, vol. 6, no. December, pp. 82–87, 2017.
- H. Assem, T. Azib, F. Bouchafaa, C. Laarouci, N. Belhaouas, and A. Hadj Arab, "Adaptive Fuzzy Logic-Based Control and Management of Photovoltaic Systems with Battery Storage," *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 2023, 2023, doi: 10.1155/2023/9065061.
- M. Barukčić, T. Varga, T. Benšić, and V. Jerković Štil, "Optimal Allocation of Renewable Energy Sources and Battery Storage Systems Considering Energy Management System Optimization Based on Fuzzy Inference," *Energies*, vol. 15, no. 19, 2022, doi: 10.3390/en15196884.
- N. N. Controller, B. Fan, L. Ni, T. Niu, and J. Wang, "Control Strategy for Energy Storage System Inverter Based on Fuzzy," no. Icmmita, pp. 1618–1623, 2015.
- E. De Santis, A. Rizzi, and A. Sadeghian, "Hierarchical genetic optimization of a fuzzy logic system for energy flows management in microgrids," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 60, pp. 135–149, 2017, doi: 10.1016/j.asoc.2017.05.059.
- L. Guo and N. M. M. Abdul, "Design and Evaluation of Fuzzy Adaptive Particle Swarm Optimization Based Maximum Power Point Tracking on Photovoltaic System Under Partial Shading Conditions," *Front. Energy Res.*, vol. 9, no. July, pp. 1–10, 2021,

doi: 10.3389/fenrg.2021.712175.

- A. Hussain, V. H. Bui, and H. M. Kim, "Fuzzy logic-based operation of battery energy storage systems (BESSs) for enhancing the resiliency of hybrid microgrids," *Energies*, vol. 10, no. 3, 2017, doi: 10.3390/en10030271.
- N. Tephiruk, W. Kanokbannakorn, T. Kerdphol, Y. Mitani, and K. Hongesombut, "Fuzzy logic control of a battery energy storage system for stability improvement in an islanded microgrid," *Sustain.*, vol. 10, no. 5, pp. 1–16, 2018, doi: 10.3390/su10051645.
- Q. Wang, Y. K. Sun, and Y. H. Huang, "Research on the control strategy of hybrid energy storage for hybrid electric vehicles based on grid partition and adaptive fuzzy neural network," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 448–453, pp. 3123–3128, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.448-453.3123.

BIODATA PENULIS



S. Nurmuslimah

Dosen Jurusan Teknik Informatika

Penulis lahir di Bima tanggal 01 Juli 1971. Penulis adalah Dosen Tetap Pada Program Studi Teknik Informatika Fakultas Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya. Menyelesaikan Pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Elektro dan melanjutkan S2 Pada Jurusan Sistem Jaringan Cerdas Multimedia ITS. Penulis Menekuni Bidang AI dan Jaringan Cerdas Multimedia.

BIODATA PENULIS



Dwi Feriyanto. S.T., M.Pd.

Dosen Program Studi DIII Teknik Elektronika
Fakultas Teknologi dan Informatika
Universitas Aisyah Pringsewu, Lampung

Penulis lahir di Jatibaru tanggal 26 Februari 1983. Penulis merupakan Dosen pada Program Studi DIII Teknik Elektronika Fakultas Teknologi dan Informatika Universitas Aisyah Pringsewu, Lampung. Penulis menyelesaikan pendidikan jenjang S1 pada Jurusan Teknik Elektro dan jenjang S2 pada Jurusan Pendidikan Teknik Elektro. Keahlian yang ditekuni yaitu elektronika rumah tangga, Internet of Things (IoT), serta instalasi penerangan dan tenaga. Saat ini, penulis juga tertarik menekuni bidang pembangkitan tenaga listrik khususnya tenaga bayu/angin.

BIODATA PENULIS



Dr. Rismen Sinambela, ST., MT.

Dosen Program Studi Magister Teknik Elektro
Universitas Kristen Indonesia

Penulis lahir di Dolok Sanggul, Sumatera Utara, pada tahun 1969. Tahun 1999 Meraih gelar Sarjana Teknik di bidang Ilmu Teknik Elektro dari Universitas Nasional. Tahun 2008 Menyelesaikan Magister Teknik di Universitas Pancasila bidang Manajemen Manufaktur. Pada tahun 2020 menyelesaikan program Doktor di IPB University pada Program Studi Ilmu Keteknikan Pertanian. Penulis telah menerbitkan beberapa Jurnal Nasional dan Internasional Terindeks Scopus serta Book Chapter.

BIODATA PENULIS



Riyani Prima Dewi, S.T., M.T.

Dosen Program Studi Teknik Listrik
Jurusan Rekayasa Elektro dan Mekatronika
Politeknik Negeri Cilacap

Penulis lahir di Brebes tanggal 8 Mei 1995. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Listrik, Jurusan Rekayasa Elektro dan Mekatronika Politeknik Negeri Cilacap. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Tenaga Listrik di Institut Teknologi Bandung pada tahun 2017 dan meraih beasiswa *fastrack* pada tahun yang sama sehingga berkesempatan melanjutkan S2 pada Jurusan Teknik Elektro di Institut Teknologi Bandung selama 1 tahun dan lulus pada tahun 2018. Pada tahun 2019 penulis diangkat menjadi Pegawai Negeri Sipil di bawah naungan Kemenristekdikbud sampai saat ini. Penulis mulai menekuni bidang menulis sejak mahasiswa dibidang-bidang kelistrikan, *power system*, dan *renewable energy*.

BIODATA PENULIS



Dwi Sasmita Aji Pambudi, S.T., M.T.

Dosen Program Studi Teknik Kelistrikan Kapal
Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS)

Penulis lahir di Lumajang tanggal 21 April 1992. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Kelistrikan Kapal, Jurusan Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS). Penulis menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Elektro di Universitas Telkom, Bandung pada tahun 2013 dan melanjutkan jenjang S2 pada Jurusan Teknik Elektro, Bidang Keahlian Elektronika di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya pada tahun 2018. Penulis mulai menekuni bidang menulis sejak awal menjadi dosen di tahun 2019. Ketertarikan bidang penelitiannya adalah elektronika industri, elektronika kontrol cerdas, elektronika daya, elektronika navigasi, *Internet of Things* (IoT), Energi Baru Terbarukan (EBT), sistem kelistrikan dan elektronika kapal. Dalam mewujudkan karir sebagai dosen profesional, penulis terus berupaya aktif dalam melakukan penelitian, pengabdian masyarakat, dan menulis baik dalam bentuk jurnal nasional maupun internasional.

BIODATA PENULIS



Leonard Lisapaly, PhD.

Dosen Program Studi Magister Teknik Elektro
Program Pascasarjana, Universitas Kristen Indonesia

Penulis lahir di Ambon, tanggal 27 April 1962. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Magister Teknik Elektro, Program Pascasarjana, Universitas Kristen Indonesia. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Indonesia, melanjutkan S2 pada Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Gadjah Mada, dan melanjutkan S3 pada jurusan Earth Sciences, University of Leeds, Inggris. Penulis menekuni bidang manajemen energi berbasis IoT dan pemodelan energi. Penulis juga mendalami pemrograman komputer dalam berbagai bahasa termasuk Matlab dan Python.

BIODATA PENULIS



Zainal Abidin

Dosen di Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas
Islam Lamongan Jawa Timur Indonesia

Zainal Abidin. Lahir di Pekalongan, Jawa Tengah. Pendidikan : S1 Teknik Elektro Universitas Islam Malang, S2 Teknik Elektro Universitas Gadjah Mada Yogyakarta, S3 Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang. Saat ini staf pengajar di Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Islam Lamongan Jawa Timur Indonesia, Instruktur K3 Ahli Tenaga Listrik LSP Nusantara Traisser, Anggota Tim Profesi Ahli bidang Mechanical Electrical Plumbing (MEP) Dinas Perumahan dan Pemukiman Kabupaten Lamongan, serta Peneliti di Litbang Pemas Universitas Islam Lamongan.