

## **BAB 2**

# **Tinjauan Pustaka**

### **2.1. Krisis Energi dan Dampaknya pada industri Manufaktur**

Ketersediaan energi menjadi tantangan krusial bagi perkembangan industri manufaktur di Indonesia. Penipisan sumber daya bahan bakar fosil, disertai meningkatnya kesadaran global akan konservasi lingkungan, semakin mendorong eksplorasi dan adopsi energi terbarukan. Sektor industri Indonesia, yang menyumbang sekitar 34% dari total konsumsi energi nasional pada tahun 2019, menghadapi tantangan besar terkait dengan tingginya intensitas energi, biaya operasional yang tinggi, serta tekanan untuk meminimalkan emisi karbon. Dalam konteks ini, peningkatan efisiensi energi dan diversifikasi sumber energi menjadi hal yang sangat penting demi keberlanjutan ekonomi dan lingkungan[13].

Pemerintah Indonesia telah merespons tantangan tersebut melalui berbagai regulasi dan kebijakan yang bertujuan mendorong efisiensi energi dan penggunaan energi terbarukan. Peraturan Presiden (Perpres) terbaru mengenai Kebijakan Energi Nasional adalah Perpres Nomor 112 Tahun 2022 tentang Percepatan Pengembangan Energi Terbarukan untuk Penyediaan Tenaga Listrik[14]. Perpres ini mengatur percepatan pengembangan energi terbarukan guna memenuhi kebutuhan listrik di Indonesia dan menetapkan target ambisius untuk kontribusi energi terbarukan dalam bauran energi nasional, lengkap dengan langkah-langkah strategis untuk mencapai tujuan tersebut. Selain itu, Undang-Undang Nomor 30 Tahun 2007 tentang Energi memberikan kerangka hukum bagi pengelolaan energi berkelanjutan di Indonesia, termasuk insentif untuk investasi energi terbarukan dan penerapan teknologi hemat energi. UU ini mengatur pengelolaan sumber daya energi, ketenagalistrikan, serta mendorong inovasi dan investasi di sektor energi bersih.

Meskipun berbagai kebijakan ini telah diterapkan, peningkatan kebutuhan energi yang didorong oleh pertumbuhan ekonomi dan populasi tetap menyebabkan masalah, seperti kenaikan biaya energi dan kerentanan terhadap fluktuasi pasokan[15]. Hal ini mendorong perusahaan manufaktur untuk mencari strategi inovatif dalam mengelola konsumsi energi dan mengurangi dampak lingkungan mereka. Salah satu pendekatan yang menjanjikan adalah mengoptimalkan penggunaan sistem udara terkompresi, yang sering kali menjadi salah satu konsumen energi terbesar di pabrik, serta mengintegrasikan sumber energi terbarukan seperti panel surya[16]. Dengan menggabungkan efisiensi operasional dan penggunaan sumber energi yang berkelanjutan, industri manufaktur di Indonesia dapat memberikan kontribusi yang signifikan dalam mewujudkan masa depan energi yang lebih bersih dan stabil[17].

## **2.2. Efisiensi Energi dalam Industri manufaktur**

Menanggapi tantangan krisis energi dan didorong oleh regulasi yang ada, efisiensi energi menjadi pilar utama dalam upaya mengurangi konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca di sektor industri manufaktur. Efisiensi energi mencakup berbagai strategi dan praktik yang bertujuan untuk mengurangi jumlah energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan barang dan jasa, tanpa mengurangi output atau kualitas[18].

Dalam konteks industri manufaktur, penerapan efisiensi energi dapat dilakukan melalui berbagai cara. Peningkatan efisiensi peralatan produksi, seperti penggunaan motor dan pompa yang lebih efisien, adalah salah satu contohnya[19]. Optimasi proses manufaktur, seperti pengurangan waktu siklus dan peningkatan hasil produksi, juga dapat mengurangi konsumsi energi per unit produk[20]. Selain itu, pemulihan panas buang dari proses industri, seperti panas dari kompresor atau boiler, dapat digunakan untuk memanaskan air atau menghasilkan listrik[21].

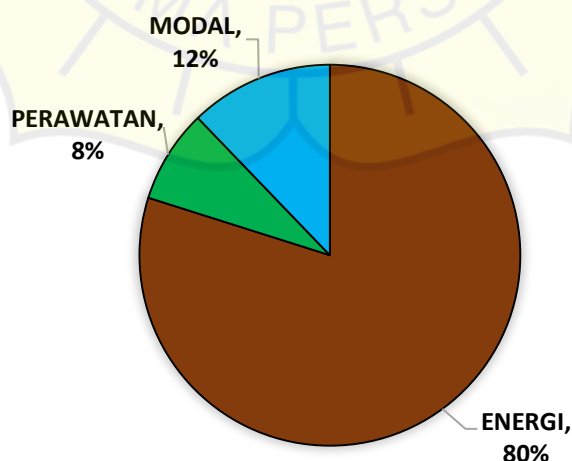
Dalam konteks sistem udara terkompresi, efisiensi energi dapat ditingkatkan melalui identifikasi dan perbaikan kebocoran, penggunaan kompresor yang lebih efisien, dan penurunan tekanan yang tidak perlu[22][23][24]. Selain itu, integrasi energi surya dapat mengurangi ketergantungan pada listrik dari jaringan utama dan

mengurangi emisi karbon[25]. Penggunaan sistem kontrol manajemen energi dapat membantu bisnis meningkatkan proses produksi dan operasional sehari-hari ke arah efisiensi energi[26]. Pengembangan Sistem Kontrol Manajemen Energi (Energy Management Control System) yang terukur dengan baik akan memudahkan dalam mengontrol penggunaan energi[27].

### 2.3 Penggunaan Energi Udara Terkompresi (CAS) dan Penghematan Energi

Sistem Udara terkompresi (CAS) memegang peranan penting dalam berbagai aplikasi industri. Namun, sistem CAS dikenal sebagai salah satu sumber penggunaan energi yang signifikan. Oleh karena itu, upaya untuk meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi konsumsi energi pada sistem CAS menjadi sangat penting.

Hampir 75% biaya hidup sistem kompresor berasal dari konsumsi listrik[28]. Efisiensi energi merupakan pertimbangan penting dalam pengoperasian sistem udara terkompresi, karena sistem ini dapat menyumbang sebagian besar dari konsumsi energi total di fasilitas industri. Salah satu tantangan utama dalam sistem udara terkompresi adalah inefisiensi energi. Merupakan catatan yang berharga bahwa biaya untuk menjalankan sistem udara terkompresi jauh lebih tinggi daripada harga kompresor itu sendiri. Pada **Gambar II.1** menunjukkan perbandingan antara biaya modal, perawatan dan energi untuk menghasilkan udara terkompresi.



**Gambar II. 1** Komponen biaya dalam Sistem udara terkompresi

Udara terkompresi sering kali menjadi sumber energi yang mahal karena pembangkitannya yang kurang efisien, dengan perkiraan hanya 10% energi yang masuk yang diubah menjadi pekerjaan yang berguna pada titik penggunaan [4].

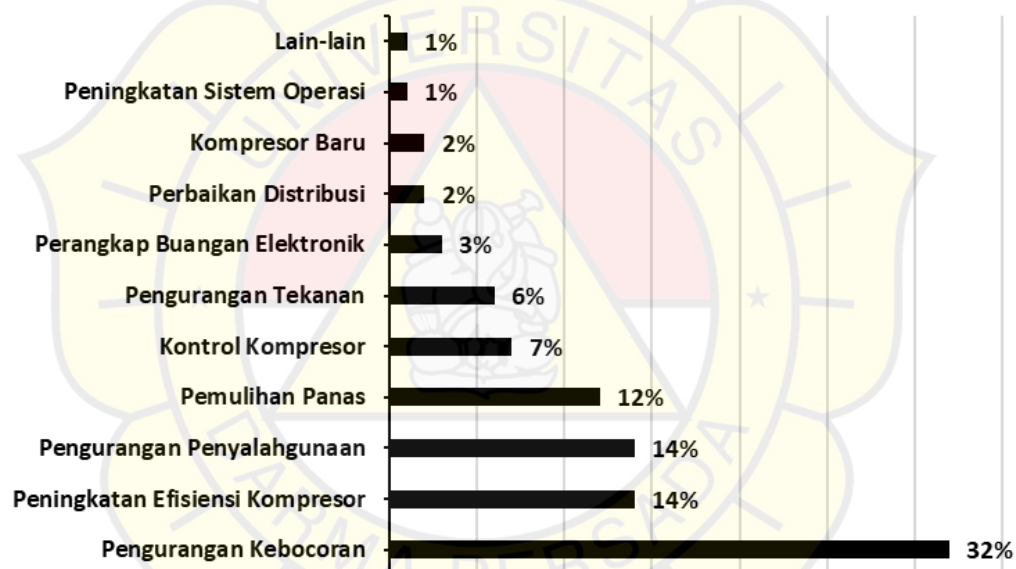
### 2.3.1 Strategi Komprehensif Penghematan Energi pada Sistem Udara Terkompresi (CAS)

Dalam sub-bab ini, akan dibahas secara komprehensif mengenai pemanfaatan energi pada sistem udara terkompresi (CAS) dan strategi penghematan energi yang dapat diterapkan. Pembahasan mencakup tinjauan terhadap berbagai perangkat lunak analisis CAS yang tersedia, serta evaluasi terhadap efektivitas berbagai langkah penghematan energi. Langkah-langkah tersebut meliputi:

- **Motor Efisiensi Tinggi:** Ganti motor standar dengan motor efisiensi tinggi untuk mengurangi rugi daya internal. Penghematan energi & biaya dengan payback period singkat.
- **Variable Speed Drive, VSD:** Gunakan VSD untuk menyesuaikan kecepatan motor dengan kebutuhan beban, terutama pada aplikasi beban variabel. Sangat efektif untuk motor besar.
- **Pencegahan Kebocoran:** Perbaiki kebocoran untuk mengurangi pemborosan energi. Payback period sangat cepat dan investasi sangat menguntungkan.
- **Udara Masuk Luar Ruangan:** Tarik udara yang lebih dingin dari luar ruangan untuk mengurangi kerja kompresor. Setiap penurunan suhu kecil menghasilkan penghematan energi.
- **Pengurangan Penurunan Tekanan:** Minimalkan penurunan tekanan dalam sistem untuk meningkatkan efisiensi peralatan.
- **Pemulihan Panas Buang:** Manfaatkan panas buang dari kompresor untuk pemanasan.
- **Nozzle Efisien:** Gunakan nozzle efisien untuk mengurangi konsumsi udara.
- **Kompresor Kapasitas Variabel:** Gunakan kompresor yang dapat menyesuaikan kapasitasnya dengan kebutuhan.

Optimasi sistem udara terkompresi menawarkan potensi besar untuk meningkatkan efisiensi energi di industri manufaktur[29]. Beberapa langkah optimasi yang dapat diterapkan meliputi identifikasi dan perbaikan kebocoran udara, pengurangan

penurunan tekanan dalam jaringan pipa, penggunaan kompresor udara yang lebih efisien, dan implementasi sistem kontrol yang cerdas. Selain itu, pemanfaatan panas buang dari kompresor udara untuk aplikasi pemanasan atau pendinginan juga dapat meningkatkan efisiensi energi secara keseluruhan. Hasil tinjauan menunjukkan bahwa penggunaan motor listrik berefisiensi tinggi dan penerapan VSD untuk menyesuaikan kecepatan dengan kebutuhan operasional dapat menghasilkan penghematan energi listrik dan penurunan biaya utilitas yang signifikan [30]. Selain itu, penerapan berbagai strategi penghematan energi juga terbukti mampu mengurangi konsumsi energi dan emisi secara substansial. Berikut ini pada **Gambar II.2** beberapa peluang penghematan energi pada sistem udara terkompresi ditampilkan, dengan penjelasan sebagai berikut.



**Gambar II. 2** Peluang Penghematan energi pada sistem udara terkompresi. Sistem udara terkompresi menawarkan peluang besar untuk penghematan energi, terutama di industri manufaktur. Peluang terbesar terletak pada pengurangan kebocoran udara, yang berpotensi menghemat hingga 32% energi. Selain itu, peningkatan efisiensi kompresor dan pengurangan penyalahgunaan sistem juga memberikan kontribusi signifikan, masing-masing menawarkan potensi penghematan sebesar 14%. Memulihkan panas buang dari kompresor juga merupakan langkah yang menjanjikan, dengan potensi penghematan 12%. Langkah-langkah lain yang dapat diambil termasuk meningkatkan kontrol kompresor (7%), mengurangi tekanan (6%), memasang perangkat buangan

elektronik (3%), memperbaiki distribusi udara (2%), dan menggunakan kompresor baru (2%). Langkah-langkah tambahan lainnya (1%) juga dapat membantu meningkatkan efisiensi energi secara keseluruhan.

### 2.3.2 Sistem Monitoring dan Analisis

Untuk mengoptimalkan efisiensi energi pada sistem udara terkompresi (CAS), implementasi sistem monitoring dan analisis yang efektif sangatlah krusial. Sistem ini memungkinkan identifikasi sumber-sumber inefisiensi, pemantauan kinerja sistem secara *real-time*, dan evaluasi efektivitas langkah-langkah penghematan energi yang telah diterapkan [28][31].

Sistem monitoring dan analisis CAS umumnya mencakup:

- **Sensor dan Transduser:** Pemasangan sensor untuk mengukur parameter kunci seperti tekanan, aliran udara, suhu, konsumsi energi, dan kelembaban di berbagai titik dalam sistem.
- **Data Logger dan Akuisisi Data:** Penggunaan data logger untuk mencatat data dari sensor secara berkelanjutan. Data logger modern dapat mentransfer data secara nirkabel ke pusat pengolahan data.
- **Perangkat Lunak Analisis:** Penggunaan perangkat lunak khusus untuk menganalisis data yang terkumpul. Perangkat lunak ini dapat menghasilkan laporan kinerja, mengidentifikasi anomali, dan memberikan rekomendasi untuk perbaikan.
- **Visualisasi Data:** Penyajian data dalam bentuk grafik dan diagram yang mudah dipahami, sehingga operator dan manajemen dapat dengan cepat mengidentifikasi masalah dan mengambil tindakan korektif.

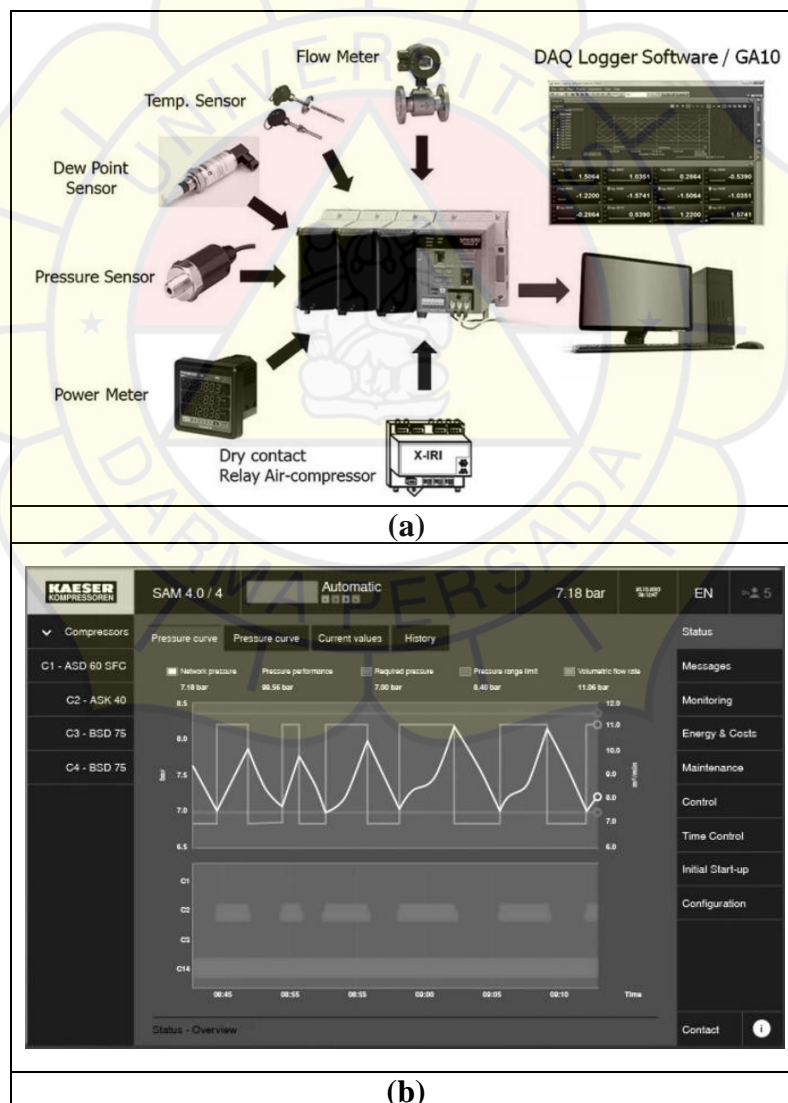
Beberapa fitur penting yang perlu diperhatikan dalam memilih sistem monitoring dan analisis CAS meliputi:

- **Kemampuan Integrasi:** Sistem harus mampu terintegrasi dengan sensor dan perangkat keras yang ada.
- **Fleksibilitas:** Sistem harus dapat dikonfigurasi untuk memenuhi kebutuhan spesifik dari sistem CAS yang dimonitor.

- **Kemampuan Analisis:** Sistem harus memiliki kemampuan analisis yang canggih, termasuk deteksi anomali, analisis tren, dan identifikasi akar masalah.
- **Kemudahan Penggunaan:** Sistem harus mudah digunakan oleh operator dan manajemen, dengan antarmuka (Interface) yang intuitif dan laporan yang jelas.

Perangkat pemantau sistem CAS modern menampilkan berbagai parameter kunci untuk memberikan gambaran komprehensif tentang kinerja sistem. **Parameter-parameter ini meliputi: Tekanan (Pressure)**, yang menunjukkan tekanan di berbagai titik dalam sistem (seperti outlet kompresor, titik penggunaan, dan sebelum/sesudah filter) dan diukur dalam satuan psi, bar, atau kPa; **Aliran Udara (Airflow)**, yang mengukur volume udara yang dikonsumsi sistem dalam satuan CFM, m<sup>3</sup>/menit, atau liter/detik; **Suhu (Temperature)**, yang mencatat suhu udara di berbagai titik kritis (misalnya, inlet kompresor, outlet aftercooler, dan udara keluar dari dryer) dalam °C atau °F; **Kelembaban (Humidity)**, yang menunjukkan kadar air dalam udara terkompresi sebagai %RH atau titik embun dalam °C atau °F; **Konsumsi Energi (Energy Consumption)**, yang mengukur konsumsi daya kompresor dan peralatan terkait dalam kW atau kWh; **Efisiensi (Efficiency)**, yang membandingkan energi yang masuk dengan udara terkompresi yang dihasilkan dan dinyatakan dalam berbagai metrik efisiensi spesifik. Selain parameter-parameter di atas, perangkat pemantau juga memberikan informasi tentang **Kondisi Peralatan (Equipment Status)**, seperti status *running/idle/fault* dari kompresor dan peralatan lainnya, serta alert dan alarm untuk kondisi abnormal seperti tekanan atau suhu yang terlalu tinggi, atau adanya kebocoran. Analisis yang lebih mendalam dimungkinkan dengan adanya **Data Historis (Historical Data)** yang disajikan dalam bentuk grafik dan tren, memungkinkan identifikasi pola dan analisis kinerja sistem dari waktu ke waktu. Beberapa sistem juga menampilkan **Informasi Tambahan** seperti estimasi **Biaya Energi (Energy Cost)** yang dikeluarkan, **Emisi (Emissions)** gas rumah kaca yang dihasilkan, **Rekomendasi (Recommendations)** untuk meningkatkan efisiensi, dan **Informasi Perawatan (Maintenance Information)** termasuk jadwal perawatan preventif. Data ini dapat diakses melalui **Layar Lokal (Local Display)** pada perangkat, **Antarmuka Web (Web Interface)**

dari komputer atau perangkat seluler, atau melalui **Integrasi dengan Sistem Lain (Integration with Other Systems)** seperti sistem manajemen energi (EMS) atau sistem kontrol industri. Dengan memantau parameter-parameter ini secara teratur, operator dan manajemen dapat membuat keputusan yang lebih baik untuk mengoptimalkan kinerja sistem CAS dan memaksimalkan penghematan energi. Di bawah ini, **Gambar II.3** adalah contoh Perangkat Pemantauan (Monitoring Device). **Gambar (a)** tersebut menggambarkan sistem monitoring dengan berbagai sensor seperti sensor suhu (Temp. Sensor), flow meter, dan dew point sensor yang terhubung ke Logger Software. **Gambar (b)** tersebut juga menampilkan antarmuka (Interface) perangkat lunak yang menunjukkan grafik atau data yang dikumpulkan oleh sensor-sensor tersebut.



**Gambar II. 3 Contoh Perangkat Pemantauan (Monitoring Device)**

## **2.4 Energi Surya: Potensi Energi Terbarukan untuk Industri Manufaktur**

Sebagai respons terhadap tantangan krisis energi dan didorong oleh kebutuhan akan keberlanjutan, energi surya muncul sebagai salah satu sumber energi terbarukan yang paling menjanjikan[32]. Energi surya, yang berasal dari radiasi matahari, memiliki potensi yang sangat besar untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan meminimalkan emisi gas rumah kaca[33]. Di Indonesia, dengan iklim tropisnya yang cerah, energi surya menawarkan peluang unik untuk memenuhi kebutuhan energi industri manufaktur[34].

Pemanfaatan energi surya menawarkan berbagai manfaat bagi industri manufaktur[35], antara lain:

- Penghematan Biaya Energi: Mengurangi ketergantungan pada listrik dari jaringan utama, menurunkan biaya energi bulanan[36].
- Pengurangan Emisi Karbon: Mengurangi emisi gas rumah kaca dan kontribusi terhadap perubahan iklim[37].
- Keberlanjutan: Meningkatkan citra perusahaan dan daya saing dengan menunjukkan komitmen terhadap keberlanjutan.
- Kemandirian Energi: Meningkatkan keamanan energi dan mengurangi kerentanan terhadap fluktuasi harga bahan bakar fosil.
- Insentif Pemerintah: Memanfaatkan insentif pajak, subsidi, dan program dukungan lainnya yang ditawarkan oleh pemerintah untuk mendorong energi terbarukan.

### **2.4.1 Integrasi Energi Surya dalam Industri Manufaktur**

Integrasi energi terbarukan, termasuk energi surya, adalah kunci untuk mencapai masa depan energi yang berkelanjutan bagi industri manufaktur. Selain energi surya, sumber energi terbarukan lainnya, seperti energi angin, energi biomassa, dan energi panas bumi, juga dapat diintegrasikan ke dalam sistem energi industri[38].

Energi surya dapat dipanen untuk menghasilkan tenaga listrik melalui panel fotovoltaik (PV). Penggunaan sistem PV surya yang menyediakan pasokan energi langsung ke instalasi atau bangunan yang membutuhkan merupakan solusi yang sangat relevan dan efektif, tergantung pada sumber daya surya yang tersedia di

lokasi tersebut[39]. Integrasi energi surya dalam industri memerlukan pendekatan yang komprehensif, meliputi:

- **Analisis Profil Beban:** Memahami kebutuhan energi spesifik industri dan menyesuaikan solusi energi terbarukan yang sesuai.
- **Pemetaan Sumber Daya:** Menilai potensi sumber daya energi terbarukan yang tersedia di lokasi industri (misalnya, radiasi matahari, kecepatan angin).
- **Desain Sistem:** Merancang sistem energi terbarukan yang efisien, andal, dan terintegrasi dengan sistem energi yang ada.
- **Analisis Ekonomi:** Mengevaluasi biaya dan manfaat investasi energi terbarukan, termasuk penghematan energi, insentif pemerintah, dan dampak lingkungan[40].

Selain itu, integrasi energi surya dalam industri dapat ditingkatkan melalui penggunaan teknologi pintar, seperti sistem manajemen energi, jaringan pintar, dan penyimpanan energi.

Dengan mengadopsi energi terbarukan dan menerapkan praktik-praktik efisiensi energi, industri manufaktur dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, mengurangi dampak lingkungan, dan meningkatkan daya saing di pasar global yang semakin berkelanjutan. Integrasi energi terbarukan bukan hanya pilihan yang bertanggung jawab secara lingkungan, tetapi juga investasi yang cerdas secara ekonomi untuk masa depan industri manufaktur.

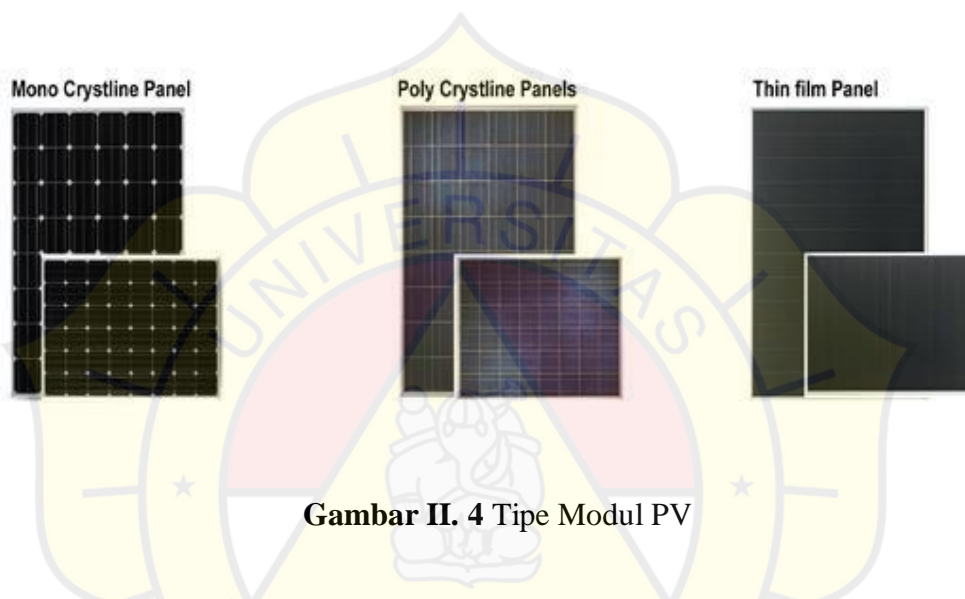
#### 2.4.2 Teknologi Panel Surya: Mengubah Cahaya Matahari menjadi Energi Listrik

Teknologi panel surya, atau fotovoltaik (PV), adalah inti dari pemanfaatan energi surya. Panel surya terdiri dari sel-sel silikon semikonduktor yang mengubah cahaya matahari langsung menjadi listrik melalui efek fotovoltaik[41]. Ada berbagai jenis panel surya yang tersedia, masing-masing dengan karakteristik dan efisiensi yang berbeda[42]., sesuai **Gambar II.4** di bawah ini :

- **Panel Surya Monokristalin:** Dikenal karena efisiensinya yang tinggi dan masa pakainya yang panjang, panel monokristalin dibuat dari kristal silikon tunggal.

- **Panel Surya Polikristalin:** Dibuat dari beberapa kristal silikon, panel polikristalin lebih murah tetapi memiliki efisiensi yang sedikit lebih rendah.
- **Panel Surya Film Tipis:** Dibuat dengan menerapkan lapisan tipis bahan fotovoltaik ke substrat, panel film tipis fleksibel dan ringan, tetapi umumnya kurang efisien daripada panel kristalin.

Pemilihan teknologi panel surya yang tepat tergantung pada faktor-faktor seperti ruang yang tersedia, anggaran, dan kebutuhan energi spesifik[43].



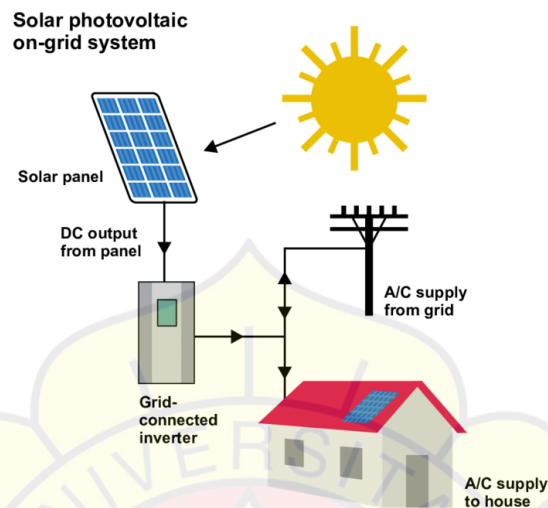
Gambar II. 4 Tipe Modul PV

#### 2.4.3 Metode Integrasi dengan Sistem Energi Listrik: Memanfaatkan Energi Surya untuk Industri

Energi yang dihasilkan oleh panel surya dapat diintegrasikan ke dalam sistem energi listrik industri manufaktur melalui berbagai cara:

- **Sistem Terhubung Jaringan (On Grid):** Sistem yang paling umum, di mana energi surya yang dihasilkan langsung disalurkan ke jaringan listrik industri. Kelebihan energi dapat dijual kembali ke jaringan, memberikan kredit energi.
- **Sistem Off-Grid:** Digunakan di lokasi terpencil atau di mana koneksi ke jaringan tidak tersedia, sistem off-grid menyimpan energi surya dalam baterai untuk digunakan saat dibutuhkan.
- **Sistem Hybrid:** Menggabungkan sistem terhubung jaringan dan off-grid, memungkinkan industri untuk memanfaatkan energi surya sambil tetap memiliki cadangan daya Listrik dari jaringan atau baterai.

Integrasi energi surya juga dapat dioptimalkan melalui penggunaan inverter pintar yang memaksimalkan produksi energi dan memantau kinerja sistem[44].



**Gambar II. 5** Skema Sistem Fotovoltaik Surya Terhubung Jaringan (On-Grid)

Pada **Gambar II.5** menggambarkan sistem fotovoltaik surya *on-grid*, yaitu sistem yang terhubung langsung ke jaringan listrik umum. Sistem ini diawali dengan panel surya yang bertugas menangkap energi matahari dan mengubahnya menjadi listrik searah (DC). Listrik DC ini kemudian dialirkan melalui output DC dari panel menuju inverter yang terhubung ke jaringan (*grid-connected inverter*). Inverter ini memiliki fungsi penting untuk mengubah listrik DC menjadi listrik bolak-balik (AC) yang sesuai dengan standar jaringan listrik dan siap digunakan di rumah. Selanjutnya, listrik AC didistribusikan ke rumah melalui suplai AC ke rumah untuk memenuhi berbagai kebutuhan, seperti penerangan dan pengoperasian peralatan elektronik. Jika produksi listrik dari panel surya melebihi kebutuhan rumah, kelebihan energi ini akan dikembalikan ke jaringan listrik melalui suplai AC dari jaringan, sehingga pemilik rumah dapat memperoleh kredit atau pengurangan tagihan listrik. Sebaliknya, jika produksi listrik dari panel surya tidak mencukupi, misalnya pada malam hari atau saat cuaca mendung, suplai AC dari jaringan akan menyediakan listrik tambahan untuk memastikan ketersediaan pasokan listrik yang

stabil dan berkelanjutan di rumah. Sistem ini memungkinkan pemanfaatan energi surya secara optimal dengan dukungan jaringan listrik sebagai penyeimbang, sehingga menjamin ketersediaan energi yang handal dan efisien.

#### **2.4.4 Manfaat Ekonomi dan Lingkungan**

Energi surya menawarkan manfaat ekonomi signifikan bagi industri manufaktur, seperti pengurangan biaya operasional dan peningkatan daya saing. Pembangunan listrik mandiri melalui fotovoltaik mengurangi ketergantungan pada tarif listrik yang fluktuatif, menghasilkan penghematan biaya dan efisiensi produksi. Insentif pemerintah seperti insentif pajak dan kredit hijau membuat investasi surya lebih ekonomis, membuka peluang pengembangan ekonomi lokal dan menciptakan lapangan kerja.

Dari segi lingkungan, energi surya mengurangi emisi gas rumah kaca, termasuk CO<sub>2</sub>. Operasi panel surya yang bersih membantu industri memenuhi standar keberlanjutan yang ketat, berkontribusi pada mitigasi perubahan iklim dan menjaga kualitas udara. Sebagai sumber energi terbarukan, energi surya memastikan keberlanjutan pasokan energi tanpa mengurangi bahan baku alam, menjadikannya solusi yang bertanggung jawab secara sosial, ekologis, dan ekonomis untuk jangka panjang.