

Kajian Hilirisasi Mineral Silika menuju Produksi Silikon Polikristalin Kualitas Sel Surya sebagai Pilar Ketahanan Energi Nasional

Suhendra^{1,3*}, Heru Susanto²

¹Program Studi Program Profesi Insinyur Fakultas Teknik Universitas Diponegoro,

²Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,
Jl. Prof. Soedarto, SH, Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

³Program Studi Teknik Kimia, Universitas Ahmad Dahlan, Kampus 4 UAD,
Jalan Ringroad Selatan, Bantul, Yogyakarta, Indonesia 55191

*)Corresponding author: suhendra@che.uad.ac.id

(Received: January 23, 2026; Accepted: February 24, 2026)

Abstract

Silica Mineral Downstreaming Study to Produce High-Quality Polycrystalline Silicon for Solar Cells as a Pillar of National Energy Security. This study comprehensively analyzes the potential for downstreaming Indonesian silica minerals towards the production of solar cell-quality polycrystalline silicon (poly-Si) as a foundation for national energy independence. The research was conducted through an integration of bibliometric analysis (Scopus 2015-2025), a production value chain study, and industrial technology benchmarking at Silicon Products Bitterfeld (SPB), Germany. The bibliometric results show the dominance of research in the metallurgical refining cluster, silica chemistry, and photovoltaic applications, emphasizing the urgency of linking materials research and industrial strategy. Technical estimates indicate that a 1 GW solar poly-Si facility requires approximately 48,000 tons of quartz stone, 218 GWh of electricity, and 250,000 m³ of deionized water per year. Global technology trends also move towards high efficiency (TOPCon, HJT, and tandem), so the need for ultrapure raw materials and energy efficiency are determining factors for industrial competitiveness. From an economic perspective, the capital expenditure (CAPEX) estimate based on industry benchmarks indicates an investment requirement of USD 221 million for a 1 GW capacity, increasing significantly to USD 1.955 billion at a 10 GW scale, as shown in the investment comparison table. This finding confirms that silica downstreaming depends not only on raw material availability but also on technological efficiency and economies of scale, which must be supported by national policies and industrial infrastructure readiness.

Keywords: photovoltaic, quartz, solar cells, silica, polycrystalline silicon, solar grade silicon

Abstrak

Kajian ini menganalisis secara komprehensif potensi hilirisasi mineral silika Indonesia menuju produksi silikon polikristalin (poly-Si) berkualitas sel surya sebagai fondasi kemandirian energi nasional. Penelitian dilakukan melalui integrasi analisis bibliometrik (Scopus 2015-2025), kajian rantai nilai produksi, serta *benchmarking* teknologi industri Silicon Products Bitterfeld (SPB), Jerman. Hasil bibliometrik menunjukkan dominasi riset pada kluster pemurnian metalurgi, kimia silika dan aplikasi fotovoltaiik, menegaskan urgensi keterhubungan antara riset material dan strategi industri. Estimasi teknis menunjukkan bahwa fasilitas poly-Si surya berkapasitas 1 GW memerlukan sekitar 48.000 ton batu kuarsa, 218 GWh listrik dan 250.000 m³ air deionisasi per tahun. Tren teknologi global turut mengarah pada efisiensi tinggi (TOPCon, HJT dan tandem), sehingga kebutuhan bahan baku *ultrapure* dan efisiensi energi menjadi penentu daya saing industri. Dari aspek ekonomi, estimasi *capital expenditure* (CAPEX) pada *benchmark* industri menunjukkan kebutuhan investasi sebesar USD 221 juta untuk kapasitas 1 GW, meningkat secara signifikan hingga mencapai USD 1,955 miliar pada skala 10 GW, sebagaimana tercantum dalam tabel

perbandingan investasi. Temuan ini menegaskan bahwa hilirisasi silika tidak hanya bergantung pada ketersediaan bahan baku, tetapi juga pada efisiensi teknologi dan skala ekonomi, yang harus ditopang oleh kebijakan nasional dan kesiapan infrastruktur industri.

Kata kunci: *fotovoltaik, kuarsa, sel surya, silika, silikon polikristalin, solar grade silicon*

How to Cite This Article: Suhendra, S., & Susanto, H. (2026). Kajian Hilirisasi Mineral Silika menuju Produksi Silikon Polikristalin Kualitas Sel Surya sebagai Pilar Ketahanan Energi Nasional. *JPII*, 4(1), 62-73. DOI: <https://doi.org/10.14710/jpii.2026.32592>

PENDAHULUAN

Potensi energi surya merupakan salah satu kekuatan strategis Indonesia dalam upaya transisi menuju ekonomi rendah karbon. Berdasarkan analisis Indonesia *Energy Transition Outlook 2025*, intensitas radiasi matahari rata-rata di Indonesia mencapai 4,8-5,4 kWh/m² per hari, dengan potensi teknis pembangkitan energi surya diperkirakan melampaui 3.000 GWp (Kabir et al., 2018; Silalahi et al., 2021). Pemerintah Indonesia menargetkan pembangunan lebih dari 100 GW kapasitas Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) hingga tahun 2045 sebagai bagian dari strategi bauran energi bersih nasional (Peraturan Presiden Republik Indonesia, 2017; Presiden Republik Indonesia, 2025). Untuk mencapai target tersebut, dibutuhkan dukungan kebijakan yang terintegrasi, terutama dalam aspek penyediaan bahan baku strategis, penguatan kapasitas industri dalam negeri, serta pembentukan rantai pasok energi surya dari hulu hingga hilir.

Dalam berbagai kesempatan, pemerintah menegaskan pentingnya hilirisasi sumber daya alam (SDA) sebagai strategi utama untuk memperkuat struktur industri nasional. Salah satu fokus utamanya adalah pengembangan industri sel surya berbasis batu silika, mengingat Indonesia memiliki cadangan silika alam yang melimpah di Bangka Belitung, Kalimantan, Sulawesi dan Papua (Muliawati, 2025; Rahmah, 2025). Komoditas silika tersebut berpotensi besar untuk diolah menjadi silikon polikristalin, bahan baku utama dalam pembuatan sel surya modern. Penerbitan Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 1 Tahun 2025 tentang Satuan Tugas Percepatan Hilirisasi dan Ketahanan Energi Nasional menjadi tonggak penting karena secara eksplisit memasukkan rantai nilai energi surya. Hilirisasi itu bermula dari sumber daya alam batu silika, yang kemudian diolah menjadi silikon metalurgi, silikon polikristalin, *ingot*, *wafers*, sel surya lalu dibentuk menjadi modul PLTS (Maurits, 2014; Sinovoltaics, 2021; Xakalashe & Tangstad, 2011). Hilirisasi ini dijadikan sebagai prioritas strategis nasional karena diharapkan mampu menciptakan rantai pasok terpadu dari bahan baku silika hingga produk akhir berupa modul PLTS, sekaligus memperkuat kemandirian energi dan daya saing industri fotovoltaik Indonesia di pasar global.

Sayangnya, hingga kini belum terdapat kajian ilmiah nasional yang komprehensif mengenai

pembangunan industri silikon polikristalin berbasis batu silika lokal. Sebagian besar riset masih berfokus pada eksplorasi material silika dan untuk aplikasi nonenergi. Sementara itu, Keppres No. 1 Tahun 2025 menegaskan perlunya koordinasi lintas lembaga, antara lain Kementerian ESDM, Kementerian Perindustrian, BRIN, PLN, LEN dan Pertamina NRE, untuk mendorong pengembangan teknologi domestik serta menutup kesenjangan dalam rantai pasok komponen PLTS berbasis bahan baku nasional. Kajian ilmiah dari berbagai negara juga menyoroti bahwa produksi *solar-grade silicon* masih menjadi tantangan global dari sisi efisiensi energi, kontrol kemurnian dan biaya produksi (Ramírez-Márquez et al., 2018).

Berdasarkan latar belakang tersebut, artikel ini didedikasikan untuk memberikan kajian awal kelayakan hilirisasi mineral silika menuju produksi silikon polikristalin sebagai pilar utama dalam mendukung program energi surya nasional. Kajian ini menelaah aspek teknis, ekonomi dan kebijakan dari proses pengolahan silika menjadi silikon kualitas *solar grade*, serta mengaitkannya dengan mandat strategis Satuan Tugas Hilirisasi Energi Nasional sebagaimana diatur dalam Keppres No. 1 Tahun 2025. Hasil analisis ini diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah bagi penyusunan *roadmap* kemandirian bahan baku energi terbarukan di Indonesia.

Metode penelitian meliputi studi literatur terhadap riset dan kebijakan terkini, serta kunjungan lapangan ke fasilitas industri silika dan silikon di dalam maupun luar negeri. Pendekatan ini diharapkan menghasilkan gambaran faktual mengenai potensi, tantangan dan peluang strategis hilirisasi batu silika untuk mendukung industri PLTS nasional. Selaras dengan arah kebijakan Keppres No. 1 Tahun 2025, hasil penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi terhadap penguatan ketahanan energi nasional Indonesia, sekaligus mengurangi ketergantungan pada impor komponen fotovoltaik.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan gabungan bibliometrik, kajian literatur dan studi lapangan untuk menilai potensi hilirisasi mineral silika menuju produksi silikon polikristalin kualitas sel surya. Tahapan penelitian terdiri dari tiga langkah utama: analisis tren riset pustaka,

kajian literatur rantai nilai hilirisasi, serta estimasi proyek pembangunan pabrik polikristalin silikon melalui *benchmarking* industri.

Analisis Bibliometrik

Analisis bibliometrik dilakukan untuk memetakan perkembangan dan fokus penelitian global terkait silikon polikristalin dan silikon kualitas sel surya selama dekade terakhir. Data bibliometrik diperoleh dari basis data Scopus menggunakan kata kunci “*polycrystalline silicon*” dan “*solar grade silicon*” pada judul, abstrak dan kata kunci dokumen, mencakup publikasi ilmiah berbahasa Inggris periode 2015-2025. Selanjutnya, VOSviewer digunakan untuk memvisualisasikan jejaring penelitian yang mencakup kolaborasi penulis, keterkaitan antarnegara dan *co-occurrence* kata kunci. Hasil pemetaan menunjukkan tiga tema utama riset global, yaitu: (1) aplikasi silikon pada teknologi fotovoltaik, (2) proses metalurgi dan pemurnian, serta (3) kimia bahan baku silika.

Kajian Rantai Nilai Hilirisasi

Kajian rantai nilai hilirisasi bahan baku silika dilakukan melalui kajian literatur ilmiah terhadap rantai nilai industri silikon polikristalin berbasis silika. Kajian ini menelaah proses dari penambangan dan pemurnian silika hingga produksi silikon *solar grade*, *wafer*, sel surya dan modul PLTS. Analisis difokuskan pada faktor teknis dan ekonomi yang menentukan kelayakan hilirisasi, termasuk kemurnian bahan baku, konsumsi energi, efisiensi proses dan kesiapan teknologi nasional.

Estimasi Proyek Pembangunan Pabrik Polikristalin Silikon

Penelitian ini melakukan kajian pembandingan (*benchmark*) dengan fasilitas industri Silicon Products Bitterfeld (SPB), Jerman, sebagai acuan dalam menyusun estimasi kebutuhan pembangunan pabrik polikristalin silikon di Indonesia. *Benchmark* ini digunakan untuk memperoleh parameter utama proyek seperti kapasitas produksi, luas lahan, kebutuhan utilitas, konfigurasi proses, serta estimasi investasi awal dan biaya operasional. Informasi dikumpulkan melalui kunjungan lapangan langsung dan diskusi lanjutan daring bersama pihak industri dan akademisi Eropa. Hasil evaluasi tersebut digunakan untuk mengadaptasi model teknis-ekonomi pabrik silikon polikristalin yang realistis dan sesuai dengan konteks sumber daya, infrastruktur dan kebijakan energi nasional Indonesia.

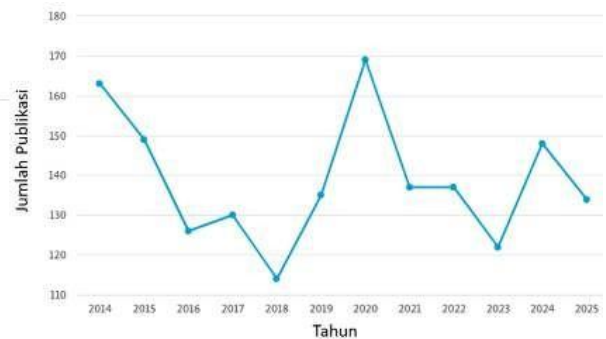
HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Bibliometrik

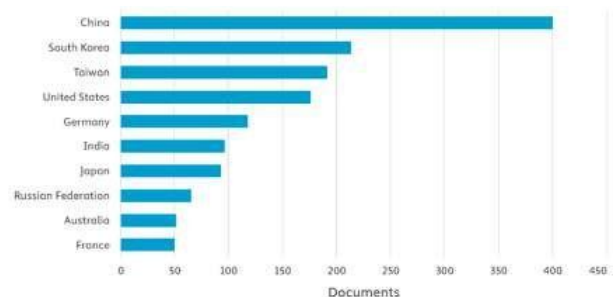
Gambar 1 menunjukkan tren jumlah publikasi ilmiah terkait silikon kualitas sel surya (*solar-grade silicon*) selama periode 2014-2025. Secara umum, jumlah publikasi mengalami fluktuasi yang cukup signifikan.

Setelah mencapai angka tinggi pada tahun 2014-2015, jumlah penelitian menurun hingga titik terendah sekitar tahun 2018. Tren ini kemudian meningkat tajam dan mencapai puncaknya pada tahun 2020, yang bertepatan dengan meningkatnya perhatian global terhadap transisi energi bersih dan pengembangan teknologi fotovoltaik. Setelah itu, jumlah publikasi kembali menurun pada 2021-2023, namun menunjukkan sedikit pemulihan pada tahun 2024, menandakan adanya minat berkelanjutan terhadap inovasi dan efisiensi proses produksi silikon untuk aplikasi energi surya.

Gambar 2 menunjukkan sepuluh negara dengan jumlah publikasi terbanyak dalam bidang penelitian silikon kualitas sel surya (*solar-grade silicon*). Tiongkok (China) menempati posisi teratas dengan lebih dari 400 dokumen, menunjukkan dominasinya dalam riset dan produksi material silikon global. Diikuti oleh Korea Selatan dan Taiwan yang juga berperan penting dalam pengembangan industri semikonduktor dan fotovoltaik. Negara lain seperti Amerika Serikat, Jerman dan India menunjukkan kontribusi signifikan dalam inovasi teknologi dan pemurnian bahan baku. Sementara Jepang, Rusia, Australia dan Prancis memiliki jumlah publikasi lebih rendah namun tetap berperan dalam pengembangan riset fundamental dan aplikatif di bidang energi surya. Secara keseluruhan, grafik ini menegaskan bahwa riset *solar-grade silicon* didominasi oleh negara-negara Asia Timur, yang menjadi pusat utama manufaktur dan inovasi teknologi fotovoltaik dunia.



Gambar 1. Tren jumlah publikasi terkait silikon kualitas sel surya (*solar grade silicon*)



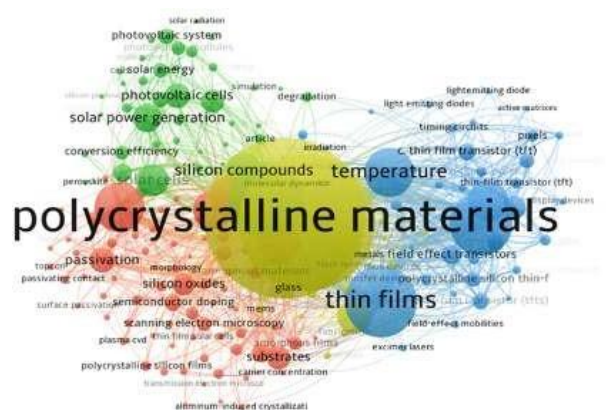
Gambar 2. Kontribusi sepuluh negara besar berdasar jumlah publikasi terkait silikon kualitas sel surya (*solar grade silicon*)

Gambar 3 memperlihatkan hasil analisis bibliometrik berupa peta jejaring keterkaitan kata kunci (*keyword co-occurrence network map*) yang menggambarkan lanskap riset global mengenai silikon polikristalin dan silikon kualitas sel surya (*solar-grade silicon*). Setiap titik pada peta merepresentasikan satu kata kunci penelitian, sedangkan garis penghubung menunjukkan seberapa sering dua kata kunci muncul bersamaan dalam publikasi ilmiah yang sama. Ukuran titik mencerminkan tingkat signifikansi atau frekuensi kemunculan suatu topik, sementara perbedaan warna menandakan pengelompokan tematik riset (klaster) dalam bidang ini.

Dari hasil pemetaan menggunakan VOSviewer, terlihat bahwa penelitian terkait silikon polikristalin terbagi menjadi tiga kluster utama. Kluster pertama, berwarna hijau, berpusat pada tema aplikasi dan teknologi, yang mencakup kata kunci seperti *solar cells*, *photovoltaic systems*, *solar energy* dan *power generation*. Kluster ini menunjukkan dominasi penelitian pada penerapan silikon kualitas surya dalam teknologi energi terbarukan, khususnya sistem fotovoltaik.

Klaster kedua, berwarna biru, berfokus pada aspek metalurgi dan pemurnian bahan, dengan kata kunci seperti *metallurgy*, *impurities*, *solidification* dan *metallurgical grade silicon*. Bidang ini menyoroti upaya peningkatan proses produksi dan kontrol kualitas material melalui pemurnian dan pengolahan termal.

Sementara itu, klaster ketiga, berwarna merah muda, menggambarkan tema bahan baku dan kimia dasar, yang mencakup istilah seperti *silica*, *silicon oxides*, *boron*, *phosphorus* dan *slag refining*, menandakan fokus pada aspek kimiawi dan rekayasa material dalam proses konversi silika menjadi silikon polikristalin.



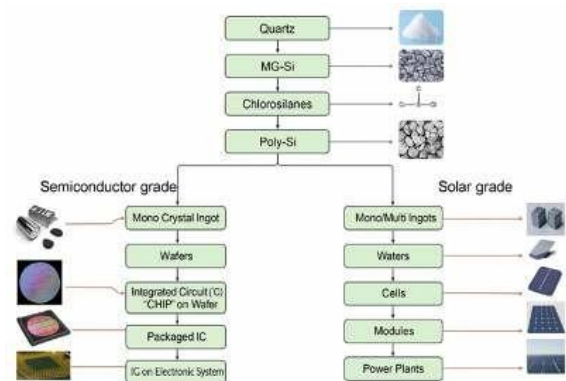
Gambar 3. Hasil analisis bibliometrik berupa peta jejaring keterkaitan kata kunci publikasi silikon polikristalin

Secara keseluruhan, visualisasi ini menunjukkan bahwa riset global tentang *solar-grade silicon* berkembang dalam tiga arah utama yang saling terhubung, yaitu pengembangan aplikasi energi surya,

peningkatan efisiensi proses metalurgi dan optimasi bahan baku silika melalui pendekatan kimia dan material. Ketiga tema ini menegaskan bahwa penelitian silikon polikristalin bersifat multidisipliner dan menjadi fondasi penting bagi kemajuan teknologi energi bersih di masa depan.

Rantai Proses Hilirisasi

Gambar 4 menunjukkan rantai proses hilirisasi bahan baku silika menjadi produk silikon untuk dua segmen industri, yaitu semikonduktor dan energi surya (*solar cell*). Alur proses dimulai dari kuarsa (*quartz*) yang diolah menjadi silikon metalurgi (MG-Si) melalui reduksi termal, kemudian ditransformasi menjadi senyawa klorosilan (*chlorosilanes*) dan selanjutnya dimurnikan menjadi silikon polikristalin (poly-Si) (Fabry & Hesse, 2012; Mallah et al., 2025; Reznichenko, 2016; Xakalashe & Tangstad, 2011).



Gambar 4. Rantai proses bahan baku silika menjadi produk silikon polikristalin

Dari titik ini, proses hilirisasi bercabang menjadi dua jalur utama. Pada sisi kiri, jalur semikonduktor (*semiconductor grade*) menghasilkan produk seperti *mono crystal ingot*, *wafers*, *integrated circuits* (ICs), hingga *packaged chips* untuk sistem elektronik berpresisi tinggi. Sementara pada sisi kanan, jalur *solar grade* menghasilkan *mono/multi ingots*, *wafers*, *cells* dan *modules* yang kemudian digunakan untuk membangun pembangkit listrik tenaga surya (PLTS).

Secara keseluruhan, diagram ini menggambarkan bagaimana sumber daya mineral silika dapat diolah secara bertingkat menjadi produk bernilai tinggi yang mendukung dua sektor strategis dunia modern di bidang teknologi informasi dan energi terbarukan (Becker et al., 2013; Gall & Rech, 2013; Méndez et al., 2021).

Proses Produksi

Tabel 1 adalah resume proses produksi utama produk polikristalin dari batu kuarsa. Proses produksi silikon polikristalin dimulai dari kuarsa (SiO_2) yang direduksi dengan karbon pada suhu tinggi di *Electric Arc*

Furnace sehingga menghasilkan silikon metalurgi (MG-Si) dengan reaksi utama:



Silikon metalurgi kemudian dimurnikan melalui reaksi hidrogenasi-klorinasi pada 300-400°C untuk membentuk triklorosilana (SiHCl_3), menggunakan reaksi:



Tabel 1. Resume proses produksi polikristalin (Becker et al., 2013; Braga et al., 2008)

Bahan baku	Proses dan kondisi operasi
Quartz/ SiO ₂ (batu silika)	<i>Carbothermic Reduction</i> $\text{SiO}_2 + 2\text{C} \rightarrow \text{Si} + 2\text{CO}$ $T \approx 1.700\text{-}2.000^\circ\text{C}$ (<i>Electric Arc Furnace</i>)
MG-Si / Metallurgical Grade Si (98-99%)	<i>Hydrogenation</i> + <i>Chlorination</i> $\text{Si} + 3\text{HCl} \rightarrow \text{SiHCl}_3 + \text{H}_2$ (300-400°C)
Polysilicon Siemens/FBR	<i>CVD Deposition</i> $\text{SiHCl}_3 + \text{H}_2 \rightarrow \text{Si} + 3\text{HCl}$ ($T \approx 1.100^\circ\text{C}$)
Ingot Polysilicon	<i>Czochralski/Directional Solidification</i> $T \approx 1.420^\circ\text{C}$ <i>crystallization</i>
Wafer Diamond wire saw	120-180 μm <i>thickness</i> + <i>Kerf loss</i>
Cell Doping + Metallization	B, P <i>diffusion</i> , PECVD n-type/P-type, <i>passivation</i>

Triklorosilan tersebut selanjutnya dideposisikan kembali menjadi silikon *ultrapure* melalui proses *Chemical Vapor Deposition* (CVD) pada $\approx 1.100^\circ\text{C}$, dengan reaksi:



Hasilnya adalah silikon polikristalin yang menjadi bahan dasar *ingot*, *wafer* dan akhirnya sel surya siap digunakan.

Polysilicon yang telah dimurnikan kemudian dilebur dan dikristalkan kembali menjadi *ingot* melalui proses *Czochralski* maupun *directional solidification* pada suhu sekitar 1.420°C untuk mendapatkan struktur kristal yang seragam. *Ingot* ini selanjutnya dipotong menjadi *wafer* tipis menggunakan *diamond wire saw*, yaitu teknik pemotongan presisi yang menghasilkan ketebalan sekitar 120-180 μm meskipun sebagian material hilang sebagai *kerf loss*. *Wafer* yang terbentuk kemudian diproses menjadi sel surya melalui tahap *doping* untuk membentuk material n-type atau p-type, diikuti proses metalisasi yang memberikan kontak elektrode sehingga sel mampu menghantarkan listrik ketika terkena cahaya.

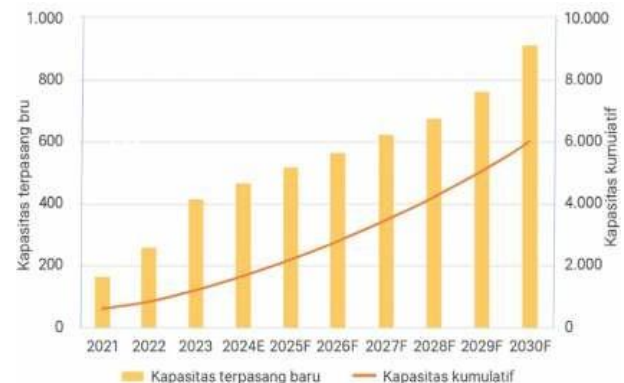
Tren Kapasitas Terpasang PLTS Global

Gambar 4 menunjukkan perkembangan kapasitas terpasang baru dan kumulatif pembangkit listrik tenaga

surya (PLTS) global dalam periode 2021 hingga proyeksi tahun 2030. Secara umum, tren menunjukkan pertumbuhan yang konsisten dan signifikan dari tahun ke tahun. Kapasitas terpasang baru (ditunjukkan oleh batang kuning) terus meningkat, menandakan percepatan pembangunan proyek PLTS di berbagai negara sebagai bagian dari upaya transisi energi bersih.

Sementara itu, garis oranye yang menggambarkan kapasitas kumulatif menunjukkan kenaikan yang semakin curam menuju tahun 2030, menandakan akumulasi proyek-proyek baru yang semakin memperbesar total kapasitas global. Berdasarkan proyeksi, pada tahun 2030 kapasitas kumulatif PLTS diperkirakan mencapai sekitar 9.000-10.000 GW, dengan kapasitas terpasang baru tahunan mendekati 900 GW per tahun.

Peningkatan ini mencerminkan pertumbuhan pesat industri energi surya yang didorong oleh kebijakan dekarbonisasi global, penurunan biaya teknologi fotovoltaik dan meningkatnya investasi pada infrastruktur energi terbarukan di seluruh dunia.



Gambar 5. Perkembangan kapasitas terpasang baru dan kumulatif PLTS global 2021-2030 (Walsh et al., 2005; Wilson et al., 2020)

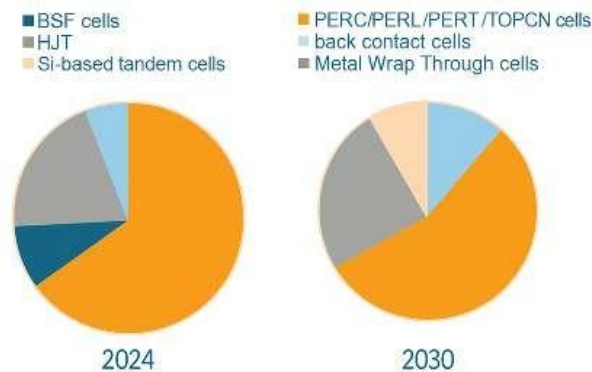
Pangsa Teknologi Sel Surya Berbasis Silikon

Gambar 6 menunjukkan dinamika evolusi teknologi sel surya berbasis silikon antara tahun 2024 dan 2030. Terlihat bahwa PERC/PERT/TOPCon masih mendominasi pasar global pada 2024, namun proporsinya mengalami penurunan pada 2030 seiring dengan meningkatnya adopsi HJT (*Heterojunction*) dan *Back Contact Cells*, yang menawarkan efisiensi konversi energi lebih tinggi (International Technology Roadmap for PV, 2025; Wilson et al., 2020).

Perubahan ini mencerminkan arah pengembangan industri fotovoltaik menuju teknologi berlapis (*tandem*) dan material dengan biaya produksi rendah serta efisiensi tinggi, selaras dengan target peningkatan performa dan keberlanjutan rantai pasok energi surya dunia.

Tabel 2 menunjukkan perbandingan empat jenis utama sel surya berbasis silikon yang saat ini banyak

digunakan dalam industri fotovoltaik, yaitu PERC, TOPCon, SHJ dan XBC.



Gambar 6. Perbandingan pangsa teknologi sel surya berbasis silikon tahun 2024 dan 2030 (International Technology Roadmap for PV, 2025)

Tabel 2. Perbandingan jenis sel silikon polikristalin, bahan baku dan efisiensi yang dihasilkan (Becker et al., 2013; Braga et al., 2008; Illiberi et al., 2009)

Jenis Sel	Bahan Baku Utama	Efisiensi
PERC (<i>Passivated Emitter Rear Cell</i>)	Silikon kristalin (mono/poly-Si) dengan lapisan pasivasi Al_2O_3 atau SiNx	22-24%
TOPCon (<i>Tunnel Oxide Passivated Contact</i>)	Silikon monokristalin (n-type) dengan lapisan oksida tipis ($\text{SiOx}/\text{PolySi}$)	25-27%
SHJ (<i>Silicon Heterojunction</i>)	Kombinasi <i>amorphous</i> Si (aSi:H) + <i>crystalline</i> Si (cSi)	24-26%
XBC (<i>Back Contact Cells: IBC, HBC, dsb.</i>)	Silikon monokristalin n-type, semua kontak di sisi belakang	25-27%
TBC (<i>TOPConbased Back Contact</i>)	Silikon n-type + lapisan pasivasi TOPCon dengan semua kontak di belakang	26-28%
Tandem Berbasis Silikon (<i>Perovskite-Si Tandem</i>)	Lapisan <i>perovskite</i> di atas <i>wafer</i> silikon monokristalin	28-33% (potensi >35%)

Sel PERC (*Passivated Emitter Rear Cell*) merupakan teknologi yang paling umum digunakan secara komersial. Sel ini menggunakan silikon kristalin (mono atau poli-Si) dengan lapisan pasivasi berbahan

Al_2O_3 atau SiNx , memberikan efisiensi konversi energi di kisaran 22-24%.

Teknologi PERC/PERT merupakan generasi yang paling matang dan saat ini masih mendominasi pasar sel surya global. Keunggulan utamanya terletak pada biaya produksi yang rendah, stabilitas performa yang baik, serta kemudahan adaptasi dari lini produksi BSF konvensional tanpa memerlukan investasi besar. Namun, keterbatasan utamanya adalah batas efisiensi teoritis yang relatif rendah, sekitar 24%, sehingga sulit bersaing dengan teknologi yang lebih baru seperti TOPCon dalam hal efisiensi konversi energi (Míguez Novoa et al., 2024).

Sementara itu, TOPCon (*Tunnel Oxide Passivated Contact*) muncul sebagai penerus alami PERC dengan efisiensi yang lebih tinggi dan stabilitas termal yang unggul. Teknologi ini dapat diimplementasikan dengan modifikasi minimal dari jalur produksi PERC, menjadikannya pilihan ideal untuk pabrik yang ingin melakukan peningkatan performa secara bertahap. Tantangannya terletak pada kompleksitas proses deposisi oksida tipis serta biaya investasi peralatan yang lebih tinggi, yang dapat meningkatkan harga awal modul (Braga et al., 2008).

Teknologi HJT (*Heterojunction*) dikenal karena kinerjanya yang sangat baik pada suhu rendah serta koefisien suhu yang kecil, menjadikannya ideal untuk wilayah beriklim tropis seperti Indonesia. Selain itu, HJT juga mendukung penggunaan modul *bifacial*, yang dapat memanfaatkan pantulan cahaya dari dua sisi modul untuk meningkatkan *output* energi. Namun, proses produksinya membutuhkan suhu rendah, vakum tinggi dan waktu proses yang lebih panjang, sehingga biaya produksinya masih tinggi dan skalabilitasnya terbatas.

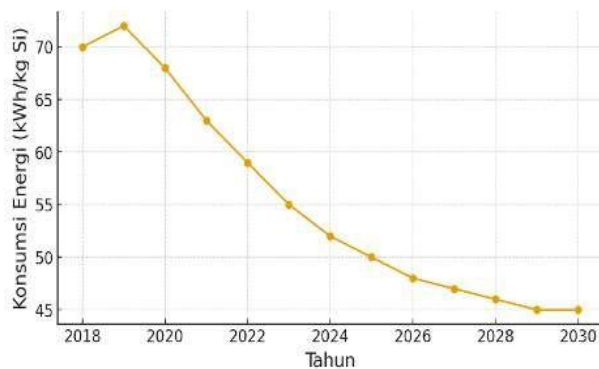
Selanjutnya, XBC atau *Back Contact Cells* seperti IBC dan ABC menawarkan keunggulan estetika dan kinerja optik yang luar biasa. Dengan permukaan depan bebas logam, sel ini dapat menyerap cahaya matahari secara maksimal dan menghasilkan tampilan yang bersih, menjadikannya sangat cocok untuk aplikasi atap bangunan (*rooftop* PV) dan proyek yang memerlukan nilai estetika tinggi. Namun demikian, fabrikasi yang kompleks dan mahal serta potensi rekombinasi pada kontak belakang menjadi kendala utama dalam produksi massalnya (Wilson et al., 2020). Terakhir, teknologi tandem atau *perovskite-silicon* merupakan generasi baru yang menggabungkan dua lapisan aktif untuk memanfaatkan spektrum cahaya yang lebih luas (UV-VIS-IR). Teknologi ini memiliki potensi efisiensi tertinggi di antara semua jenis sel surya, bahkan dapat mendekati 30%, dan tengah menjadi fokus utama riset di berbagai laboratorium dunia. Meskipun demikian, stabilitas material *perovskite* terhadap panas dan kelembapan masih menjadi tantangan besar, serta skala produksi industri belum tercapai sehingga aplikasinya masih terbatas pada *pilot plant* dan pengembangan riset.

Secara keseluruhan, Gambar 6 dan Tabel 2 memperlihatkan bahwa perkembangan teknologi sel surya terus berfokus pada peningkatan efisiensi konversi energi melalui rekayasa material silikon dan desain lapisan pasivasi yang lebih optimal, dengan sel PERC/TOPCon dan XBC menjadi kandidat utama untuk generasi lanjutan modul surya berperforma tinggi.

Konsumsi Energi

Gambar 7 menunjukkan tren perubahan konsumsi energi listrik dalam proses produksi polikristalin silikon kelas surya (*Solar Grade/SoG*) dari tahun 2018 hingga 2030. Terlihat bahwa penggunaan energi mengalami penurunan berkelanjutan, dari sekitar 70 kWh/kg pada 2018 hingga diproyeksikan mencapai ± 45 kWh/kg pada 2030.

Penurunan ini merupakan dampak dari berbagai kemajuan teknologi dalam proses pemurnian silikon, termasuk optimalisasi reaktor produksi, peningkatan efisiensi pemulihan panas, integrasi sistem kontrol proses yang lebih presisi, serta peningkatan kualitas bahan baku. Efisiensi tersebut secara langsung berkontribusi terhadap penurunan kebutuhan listrik per kilogram produk *polysilicon*.



Gambar 7. Konsumsi energi produksi polikristalin silikon (Brailovsky et al., 2025)

Secara industri, tren ini memiliki dampak signifikan. Semakin rendah konsumsi energi pada produksi SoG, maka biaya produksi panel surya akan semakin menurun, sehingga energi surya menjadi semakin kompetitif dibandingkan sumber energi fosil. Dengan kata lain, peningkatan efisiensi dalam produksi SoG menjadi salah satu faktor kunci dalam menekan biaya energi terbarukan dan mempercepat transisi global menuju energi bersih.

Hasil Perbandingan (*Benchmark*)

Gambar 8 menggambarkan rantai proses produksi polikristalin silikon dari bahan baku alam hingga menjadi modul sel surya di Silicon Products Bitterfeld, Jerman. Proses dimulai dari *quartz* atau batu silika, yang kemudian direduksi menjadi silikon metalurgi (MG-Si)

melalui proses pirometalurgi pada suhu tinggi. Selanjutnya, silikon metalurgi dimurnikan menjadi silikon polikristalin (Poly-Si) berkualitas tinggi melalui proses kimia dan pemurnian bertingkat. Bahan ini diproses lebih lanjut menjadi *wafer* silikon, yaitu lembaran tipis yang menjadi substrat utama dalam pembuatan sel surya (*solar cells*). Akhirnya, sel-sel surya tersebut dirangkai dan dikemas menjadi modul surya (*solar modules*) yang siap digunakan untuk menghasilkan listrik tenaga surya. Diagram ini menunjukkan keterkaitan teknologis antar-tahap dalam rantai nilai industri fotovoltaik, setiap proses memerlukan spesifikasi kemurnian, energi dan teknologi manufaktur yang berbeda untuk mencapai efisiensi konversi energi maksimum.



Gambar 8. Diagram alir proses produksi rantai nilai produk polikristalin silikon

Batu kuarsa yang digunakan sebagai bahan baku pembuatan silikon metalurgi (MG-Si) harus memiliki kemurnian tinggi dengan kandungan SiO_2 minimal 99,9 wt.% (Méndez et al., 2021; Míguez Novoa et al., 2024). Selain itu, kandungan impuritas logam dan oksida harus dijaga pada batas sangat rendah karena memengaruhi efisiensi reduksi dan kemurnian silikon yang dihasilkan. Secara umum, batas maksimum yang diperbolehkan meliputi $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0,05$ wt.%, $\text{Al}_2\text{O}_3 < 0,10$ wt.%, $\text{TiO}_2 < 0,03$ wt.%, serta gabungan $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} < 0,10$ wt.%. Untuk bahan baku silikon *solar-grade*, unsur non-logam seperti boron (B) dan fosfor (P) harus ditekan hingga masing-masing di bawah 1 ppm dan 0,3 ppm, karena dapat mengganggu *p-n junction* dan menurunkan resistivitas *wafer* sel surya. Secara fisik, bahan kuarsa yang ideal memiliki ukuran butir 2-16 mm untuk memastikan distribusi panas yang seragam di dalam tungku busur listrik, densitas tinggi dan porositas rendah agar reaksi karbotermal berlangsung efisien, serta struktur kristal kuarsa atau kuarsit dengan kestabilan termal tinggi (titik leleh sekitar 1.713°C) yang lebih disukai dibanding bentuk amorf karena memberikan stabilitas dan reaktivitas optimal selama proses peleburan.

Kunjungan studi banding telah dilakukan (Husna, 2020; Suhendra, 2020). Berdasarkan hasil observasi dan studi perbandingan terhadap fasilitas produksi silikon polikristalin di Silicon Products Bitterfeld (SPB), Jerman, diketahui bahwa seluruh kompleks pabrik dibagi ke dalam beberapa unit proses utama yang saling terintegrasi. Pembagian ini mencakup unit produksi bahan baku, unit proses utama, unit utilitas, serta bangunan penunjang dan infrastruktur pendukung (Tiefel & Friedrich Schaaf, 2019).

Rangkaian Proses Produksi

Mengacu alur proses produksi industri Silikon Metalurgi (MG-Si), unit produksi yang diperlukan meliputi:

- Unit Produksi Klorosilan (*Chlorosilan* Unit 1) yang menghasilkan senyawa antara seperti *trichlorosilane* (SiHCl_3) dan *tetrachlorosilane* (SiCl_4).
- Fasilitas Penyimpanan (*Tank Farm*-Unit 2) untuk bahan cair dan gas bertekanan.
- Unit Hidrogenasi (*Converter*-Unit 3) untuk mengonversi SiCl_4 menjadi SiHCl_3 .
- Unit Pemulihan Gas Buang (*Vent Gas Recovery*-Unit 4) yang mendaur ulang H_2 , SiHCl_3 dan SiCl_4 .
- Unit Distilasi (Unit 5) sebagai tahap pemurnian akhir sebelum deposisi.
- Reaktor Siemens (Unit 6) untuk proses deposisi silikon polikristalin.
- Unit Produksi Batang Ramping (*Slim Rod*-Unit 8) sebagai komponen inti dalam reaktor.
- Pabrik Penunjang (*Auxiliary Plant*-Unit 9) yang mendukung operasi utama seperti pasokan bahan kimia, udara, dan energi.

Teknologi dan Peralatan Produksi

Proses produksi silikon polikristalin didasarkan pada teknologi Siemens, dengan perangkat utama meliputi:

- Reaktor deposisi poli-Si yang beroperasi dengan gas campuran *trichlorosilane* dan hidrogen.
- *Vaporizer* atau sistem injeksi untuk menghasilkan gas umpan (*feed gas*).
- Sistem pendingin dan catu daya *thyristor* dengan transformator khusus untuk pengendalian suhu dan daya reaktor.
- Unit hidrogenasi untuk pembentukan SiHCl_3 dari SiCl_4 .
- Sistem pemulihan gas buang dan daur ulang bahan berharga (SiCl_4 , H_2 , HCl).
- Fasilitas penyimpanan dan distribusi bahan kimia serta sistem pengemasan produk silikon polikristalin.

Selain itu, tersedia fasilitas analitik lengkap seperti laboratorium kontrol kualitas, peralatan penghancur batang silikon, serta sistem pengolahan air deionisasi (DIW) dan *wastewater treatment* (WWT).

Sistem Utilitas dan Pendukung

Fasilitas produksi didukung oleh sistem utilitas yang meliputi:

- Peralatan tegangan tinggi (*high voltage switchgear*) dan sistem distribusi daya.
- Sistem pemanas, pendingin dan pemulihan panas untuk menjaga kestabilan termal proses.
- Pabrik udara bertekanan, menara pendingin dan sistem uap untuk distilasi.

- Sistem keamanan, komunikasi, kontrol data dan catu daya tanpa gangguan (UPS).
- Sistem proteksi kebakaran dan *abatement system* untuk penanganan gas buang terkontaminasi.

Bangunan dan Infrastruktur

Kompleks pabrik dirancang dengan pembagian fungsi yang jelas dan efisien, mencakup:

- Gedung Reaktor 1, berisi reaktor deposisi, *vaporizer*, sistem pendingin dan *thyristor*.
- Area Pabrik Kimia, mencakup unit distilasi dan pemulihan gas proses.
- Gedung Analitik, berfungsi sebagai laboratorium, pusat kontrol data dan area pemeliharaan.
- Gedung Kantor, untuk manajemen, teknik dan kegiatan administratif.
- Gedung Penyimpanan, mencakup area penerimaan, pengiriman dan pengumpulan limbah material.
- Gedung Utilitas, tempat beroperasinya sistem pendukung dan fasilitas umum pabrik.

Kebutuhan Bahan Baku

Tabel 3 menunjukkan estimasi kebutuhan bahan baku utama untuk proses produksi silikon polikristalin mulai dari bahan mentah batu kuarsa hingga utilitas pendukung seperti listrik, gas dan air. Secara umum, seluruh kebutuhan bahan meningkat secara linier terhadap kapasitas produksi, menandakan bahwa skala pabrik menjadi faktor penentu utama dalam perencanaan rantai pasok industri hilirisasi silika.

Pada kapasitas 1 GW, kebutuhan batu kuarsa mencapai sekitar 48.000 ton per tahun, sedangkan untuk skala 5 GW dan 10 GW masing-masing meningkat menjadi 240.000 ton dan 480.000 ton. Kuarsa ini menjadi bahan dasar untuk menghasilkan silikon metalurgi (MG-Si) melalui proses reduksi dengan batu bara dan grafit, yang masing-masing dibutuhkan sebesar 20.000 ton dan 90 ton pada kapasitas 1 GW.

Selain batu kuarsa, kebutuhan pasir silika untuk kaca modul surya juga cukup besar. Untuk modul *single-glass*, dibutuhkan sekitar 28.000 ton pada 1 GW, meningkat menjadi 273.000 ton pada 10 GW. Sedangkan untuk modul *double-glass*, angkanya lebih tinggi yakni 45.000 ton untuk 1 GW dan mencapai 443.000 ton untuk 10 GW. Hal ini menunjukkan bahwa pemilihan jenis modul (*single* atau *double glass*) berpengaruh signifikan terhadap total konsumsi silika nasional.

Dari sisi energi dan bahan kimia, proses ini tergolong padat energi dan bahan kimia korosif. Kebutuhan listrik mencapai 218 GWh/tahun untuk kapasitas 1 GW dan meningkat hingga 2.180 GWh/tahun untuk 10 GW, sejalan dengan intensitas proses reduksi, klorinasi dan deposisi pada reaktor Siemens. Bahan kimia seperti HCl dan H_2 dibutuhkan dalam jumlah besar, masing-masing sekitar 25.000 ton dan 7.500 ton pada

kapasitas 1 GW. Sementara produk samping SiCl_4 yang dihasilkan akan diregenerasi kembali sebagai bahan antara, menunjukkan penerapan sistem sirkular pada proses industri.

Kebutuhan air deionisasi (DIW) juga tinggi karena digunakan untuk pendinginan, pencucian dan kontrol kemurnian bahan. Pada kapasitas 10 GW, jumlahnya mencapai 2,5 juta m^3 /tahun, yang menuntut keberadaan sistem pengolahan dan daur ulang air industri yang efisien. Selain itu, gas pendukung seperti nitrogen (N_2) dan gas alam (CH_4) diperlukan untuk proses inertisasi dan pembangkitan panas, masing-masing dengan kebutuhan hingga 30.000 ton N_2 dan 2 juta m^3 CH_4 pada kapasitas maksimum.

Tabel 3. Estimasi kebutuhan bahan baku utama

Bahan Baku	Utama	Kebutuhan Bahan Baku		
		1 GW	5 GW	10 GW
Batu kuarsa		48.000	240.000	480.000
(SiO_2) ¹				
Pasir silika ¹				
- <i>Single glass</i>		28.000	137.000	273.000
- <i>Double glass</i>		45.000	222.000	443.000
Batu bara ¹ (coal)		20.000	100.000	200.000
Grafit (<i>electrode carbon</i>)		90	450	900
Listrik ² (energi total)		218.000	1.090.000	2.180.000
HCl ¹ (hidrogen klorida)		25.000	125.000	250.000
H_2 (hidrogen gas)		7.500	37.500	75.000
SiCl_4 ¹ (<i>silicone tetrachloride</i>)		8.000	40.000	80.000
Air ³		250.000	1.250.000	2.500.000
Deionisasi ¹ (DIW)				
Nitrogen (N_2)		3.000	15.000	30.000
Gas alam ³ (CH_4)		200.000	1.000.000	2.000.000

Keterangan: ¹: dalam ton/ tahun. ²: dalam MWh/tahun; ³: dalam m^3 /tahun

Secara keseluruhan, tabel ini menegaskan bahwa pembangunan pabrik silikon polikristalin berskala besar di Indonesia memerlukan integrasi erat antara sumber daya mineral, bahan kimia dan energi, serta perencanaan lingkungan yang komprehensif. Optimalisasi pasokan lokal batu kuarsa, pasir silika dan energi rendah karbon akan menjadi kunci keberlanjutan dan daya saing industri hilirisasi silikon nasional di masa depan.

Estimasi Kebutuhan Lahan

Tabel 4 menunjukkan hasil estimasi kebutuhan lahan untuk pembangunan fasilitas produksi silikon polikristalin dengan kapasitas terpasang masing-masing 1 GW, 5 GW dan 10 GW. Estimasi ini mencakup luas area untuk tiga tahap utama proses manufaktur, yaitu *ingot &*

wafer, *cell* dan *module*, yang dihitung berdasarkan luas area produksi, bangunan, serta total tapak pabrik secara keseluruhan.

Pada kapasitas 1 GW, total area tapak keseluruhan diperkirakan mencapai 166.000 m^2 atau sekitar 16,6 hektar, dengan pembagian terbesar pada area modul (67.000 m^2) dan *cell* (58.000 m^2). Untuk skala 5 GW, kebutuhan lahan meningkat menjadi 621.000 m^2 ($\pm 62,1$ ha), sedangkan pada 10 GW mencapai 1.134.000 m^2 ($\pm 113,4$ ha).

Dari hasil perbandingan tersebut terlihat bahwa peningkatan kapasitas produksi berbanding lurus dengan kebutuhan lahan, terutama pada unit *ingot & wafer* yang memiliki proporsi terbesar terhadap total luas bangunan. Hal ini mencerminkan karakteristik industri silikon yang padat modal dan memerlukan fasilitas produksi bersih dengan pengendalian suhu serta lingkungan yang ketat.

Secara keseluruhan, hasil estimasi ini memberikan gambaran realistis mengenai kebutuhan lahan fisik untuk pengembangan industri hilirisasi silikon polikristalin di Indonesia, yang dapat dijadikan acuan awal dalam perencanaan tata ruang kawasan industri energi surya terpadu.

Estimasi Kebutuhan Energi

Gambar 7 menunjukkan perbandingan kebutuhan energi listrik tahunan pada proses produksi *photovoltaic* (PV) untuk tiga kapasitas industri, yaitu 1 GW, 5 GW dan 10 GW. Terdapat tiga tahap utama dalam manufaktur PV yang dianalisis, meliputi *ingot & wafer*, *cell* dan *module*.

Dari grafik terlihat bahwa konsumsi listrik terbesar berada pada tahap *ingot & wafer*, dengan kebutuhan energi mencapai 87 GWh/tahun untuk 1 GW, meningkat drastis menjadi 433 GWh/tahun pada 5 GW, serta 865 GWh/tahun pada kapasitas 10 GW. Hal ini menunjukkan bahwa proses peleburan material silikon dan pembentukan *wafer* merupakan tahap paling intensif energi pada rantai produksi PV.

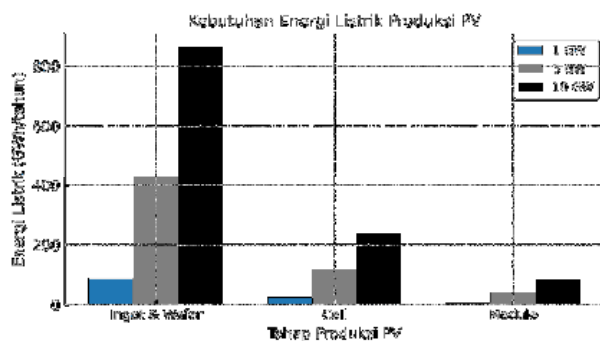
Tahap *cell* menempati konsumsi energi tertinggi kedua, dengan kebutuhan sebesar 24 GWh/tahun (1 GW), 119 GWh/tahun (5 GW) dan 238 GWh/tahun (10 GW). Sementara itu, produksi *module* memiliki kebutuhan energi paling rendah, masing-masing 8 GWh/tahun, 42 GWh/tahun dan 84 GWh/tahun, sesuai urutan kapasitas produksi.

Secara umum, grafik ini menunjukkan bahwa peningkatan kapasitas produksi PV akan meningkatkan kebutuhan energi secara proporsional. Produksi material awal (*ingot & wafer*) menjadi penentu utama total konsumsi energi dalam industri PV. Temuan ini mengindikasikan bahwa strategi efisiensi energi dan pemanfaatan energi terbarukan sebaiknya difokuskan pada tahap awal produksi silikon, guna menekan jejak energi dan biaya produksi panel surya secara menyeluruh.

Jika dibandingkan dengan tren terbaru dari Gambar 6, produksi Silicon Products Bitterfeld tahun

2019 menunjukkan konsumsi energi yang relatif lebih tinggi dari kondisi terkini, terutama pada proses terkait polikristalin dan *wafer*. Kajian dari Fraunhofer Institute tersebut (Brailovsky et al., 2025) melaporkan bahwa konsumsi listrik spesifik untuk produksi *Solar Cell Grade* (SoG) *polysilicon* telah turun hingga 60-71 kWh/kg pada 2023, dengan proyeksi mencapai 49-54 kWh/kg pada 2030 akibat peningkatan efisiensi CVD dan semakin luasnya penggunaan *Fluidized Bed Reactor* (FBR).

Dampaknya, rantai produksi PV modern akan menunjukkan kecenderungan penurunan proporsi energi pada segmen *ingot & wafer*, terutama jika FBR dan teknologi *ingot* berukuran besar (G12/N-type, HJT, TOPCon) terus berkembang. Hal ini berpotensi menggeser profil energi PV di masa depan dari dominasi proses *upstream* (*Ingot-Wafer*) menuju keseimbangan yang lebih merata antara *cell* dan *module*, seiring penggunaan proses deposisi dan perawatan permukaan yang lebih efisien.



Gambar 7. Estimasi konsumsi energi produksi polikristalin silicon di Silicon Products Bitterfeld tahun 2019

Air dan Gas Alam

Tabel 5 menunjukkan perkiraan kebutuhan air dan gas alam untuk proses produksi silikon polikristalin yang dikonversi menjadi komponen utama sistem fotovoltaik, yaitu *ingot & wafer*, *cell* dan *module*, pada kapasitas produksi 1 GW, 5 GW dan 10 GW per tahun. Secara umum, unit *ingot & wafer* merupakan konsumen energi terbesar, dengan kebutuhan listrik mencapai 87 GWh/tahun untuk kapasitas 1 GW dan meningkat linier hingga 865 GWh/tahun pada 10 GW. Selain itu, unit ini juga memerlukan air baku sebesar 148.000 m³/tahun serta menghasilkan air limbah sekitar 100.500 m³/tahun pada kapasitas 1 GW, yang meningkat sepuluh kali lipat pada skala 10 GW.

Pada tahap produksi *cell*, konsumsi energi listrik tercatat 24 GWh/tahun untuk kapasitas 1 GW dan meningkat menjadi 238 GWh/tahun untuk kapasitas 10 GW. Tahap ini juga menunjukkan penggunaan air yang cukup tinggi, yaitu 187.000-1.880.000 m³/tahun, dengan potensi air limbah hingga 1,49 juta m³/tahun pada kapasitas maksimum. Selain itu, proses ini memerlukan

gas alam sebagai sumber panas dan bahan pendukung reaksi kimia, dengan estimasi kebutuhan mencapai 175.000-1.750.000 m³/tahun.

Sementara itu, unit modul relatif memiliki konsumsi energi paling rendah, yaitu sekitar 8 GWh/tahun pada kapasitas 1 GW dan 84 GWh/tahun pada kapasitas 10 GW, karena sebagian besar proses bersifat perakitan dan laminasi.

Tabel 4. Estimasi kebutuhan lahan produksi

Komponen	Estimasi Luas Area Produksi (m ²)		
	1 GW	5 GW	10 GW
(Gross Manufacturing Area)			
<i>Ingot & wafer</i>	10.000	52.000	95.000
<i>Cell</i>	8.700	31.500	60.000
<i>Module</i>	8.600	29.000	54.000
Subtotal luas produksi	17.300	60.900	209.000
Total luas bangunan			
<i>Ingot & wafer</i>	14.000	60.000	110.000
<i>Cell</i>	11.800	42.600	77.000
<i>Module</i>	16.400	57.000	102.000
Subtotal bangunan	42.200	159.600	289.000
Total area tapak (site area)			
<i>Ingot & wafer</i>	49.000	210.000	378.000
<i>Cell</i>	58.000	183.000	348.000
<i>Module</i>	67.000	228.000	408.000
Total luas	166.000	621.000	1.134.000

Hasil estimasi ini menunjukkan bahwa produksi *ingot* dan *wafer* merupakan tahap paling intensif dalam penggunaan energi dan air, sedangkan proses *cell* lebih banyak memerlukan gas alam sebagai penunjang operasional. Dengan demikian, perencanaan fasilitas hilirisasi silikon di Indonesia perlu mempertimbangkan ketersediaan energi listrik yang stabil, sistem daur ulang air industri dan pasokan gas alam yang efisien untuk menjamin keberlanjutan dan efisiensi operasional pabrik dalam jangka panjang.

Tabel 5. Estimasi kebutuhan air dan gas alam

Produk	Parameter	Kebutuhan Air dan Gas Alam		
		1 GW	5 GW	10 GW
<i>Ingot & wafer</i>	Air baku (m ³ /tahun)	148.000	740.000	1.480.000
	Air limbah (m ³ /tahun)	100.500	502.500	1.005.000
<i>Cell</i>	Air baku (m ³ /tahun)	187.000	940.000	1.880.000
	Air limbah (m ³ /tahun)	149.000	745.000	1.490.000
	Gas alam (m ³ /tahun)	175.000	875.000	1.750.000

Estimasi Nilai Investasi

Tabel 6 menunjukkan hasil diskusi dengan manajemen SPB Jerman rentang waktu 2019-2020 tentang estimasi nilai investasi (*Capital expenditure/CAPEX*) untuk pembangunan fasilitas manufaktur sel surya terintegrasi, mulai dari proses *ingot* dan *wafer, cell*, hingga *module*, pada berbagai skala kapasitas produksi. Nilai tersebut sudah termasuk peralatan dan gedung. Untuk kapasitas 1 GW, total investasi yang dibutuhkan mencapai 221 juta USD, terdiri dari 101 juta USD untuk *ingot & wafer*, 79 juta USD untuk *cell*, dan 42 juta USD untuk *module*. Pada kapasitas 2 GW, kebutuhan investasi meningkat menjadi 490 juta USD, yang mencakup 202 juta USD untuk *ingot & wafer*, 212 juta USD untuk *cell* dan 76 juta USD untuk *module*.

Sementara itu, pada skala industri besar sebesar 10 GW, total investasi sekitar 1,955 miliar USD, dengan porsi terbesar terdapat pada proses *ingot & wafer* sebesar 891 juta USD, diikuti *cell* sebesar 737 juta USD dan *module* sebesar 327 juta USD. Data ini memperlihatkan bahwa skala kapasitas produksi yang lebih besar memberikan kebutuhan investasi yang jauh lebih tinggi, namun berpotensi memberikan efisiensi biaya per GW karena adanya skala keekonomian (*economies of scale*).

Meskipun estimasi tersebut dapat digunakan sebagai acuan dasar, angka-angka tersebut berpotensi mengalami koreksi karena perubahan biaya teknologi, harga peralatan, dinamika pasar tenaga kerja, kebijakan energi, serta fluktuasi harga material dan logistik internasional. Oleh karena itu, sebelum dijadikan dasar keputusan investasi, nilai CAPEX tersebut perlu diperbarui (*updated*) melalui studi kelayakan (*Feasibility Study*) yang mempertimbangkan kondisi terbaru, termasuk insentif pemerintah, biaya utilitas lokal, serta tingkat kematangan teknologi manufaktur PV yang terus berkembang. Dengan kata lain, angka dalam tabel bukan merupakan estimasi final, tetapi indikasi awal yang wajib divalidasi dengan data terkini.

Tabel 6. Estimasi nilai investasi

Kapasitas Produksi	Nilai Investasi (juta USD)			
	<i>Ingot & wafer</i>	<i>Cell</i>	<i>Module</i>	Total CAPEX
1 GW	101	79	42	221
2 GW	202	212	76	490
10 GW	891	737	327	1.955

KESIMPULAN

Kajian ini menegaskan bahwa hilirisasi mineral silika menuju produksi polikristalin silikon merupakan langkah strategis untuk memperkuat kemandirian energi nasional Indonesia. Indonesia memiliki cadangan batu kuarsa dan pasir silika yang sangat besar, namun hingga kini belum dimanfaatkan secara optimal untuk menghasilkan bahan baku *solar-grade silicon*. Melalui pengembangan rantai nilai dari tambang silika hingga

modul sel surya, Indonesia berpeluang mengurangi ketergantungan impor komponen fotovoltaik dan membangun industri energi terbarukan berbasis sumber daya domestik.

Dari sisi teknologi, hasil analisis menunjukkan bahwa proses produksi silikon polikristalin dapat mengacu pada model industri seperti Silicon Products Bitterfeld (SPB) Jerman, dengan adaptasi terhadap kondisi energi, bahan baku dan infrastruktur nasional. Proses ini padat energi dan kimia, namun dapat dioptimalkan melalui integrasi sistem utilitas, pemulihan gas buang, serta daur ulang air industri. Kajian kebutuhan bahan baku, lahan dan energi menegaskan pentingnya perencanaan terpadu agar investasi industri ini efisien dan berkelanjutan.

Secara keseluruhan, implementasi program hilirisasi silika tidak hanya berkontribusi terhadap ketahanan energi nasional tetapi juga membuka peluang besar bagi inovasi teknologi dan lapangan kerja hijau. Dukungan kebijakan pemerintah melalui Keppres No. 1 Tahun 2025 serta kolaborasi lintas lembaga menjadi faktor kunci dalam mewujudkan ekosistem industri silikon polikristalin yang mandiri, berdaya saing global dan berorientasi pada keberlanjutan lingkungan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Prodi Teknik Kimia Universitas Ahmad Dahlan yang telah mendanai sebagian biaya perjalanan kunjungan ke Silicon Products Bitterfeld, Jerman, tahun 2019.

DAFTAR PUSTAKA

- Becker, C., Amkreutz, D., Sontheimer, T., Preidel, V., Lockau, D., & Haschke, J. (2013). Polycrystalline silicon thin-film solar cells: Status and perspectives. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 119(December 2013), 112–123. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.05.043>
- Braga, A. F. B., Moreira, S. P. Â., Zampieri, P. R., Bacchin, J. M. G., & Mei, P. R. (2008). *New processes for the production of solar-grade polycrystalline silicon: A review*. 92, 418–424. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2007.10.003>
- Brailovsky, M. S. P., Gervais, E., & Nold, I. S. (2025). ANALYSIS OF THE ELECTRICITY CONSUMPTION FOR THE PRODUCTION OF ELECTRONIC-GRADE POLYSILICON.
- Fabry, L., & Hesse, K. (2012). Crystalline silicon feedstock preparation and analysis. In *Semiconductors and Semimetals* (Vol. 87, pp. 185–261). Elsevier.
- Gall, S., & Rech, B. (2013). Technological status of polycrystalline silicon thin-film solar cells on glass. *Solar energy materials and solar cells*, 119, 306–308. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.08.041>

- Husna, M. (2020). *Polycrystalline Silicone, Silicon Products Bitterfeld, Germany-UAD Yogyakarta*. <https://www.youtube.com/watch?v=08QtV8kfoI>
- Illiberi, A., Sharma, K., Creatore, M., & Van De Sanden, M. C. M. (2009). Novel approach to thin film polycrystalline silicon on glass. *Materials Letters*, 63(21), 1817-1819. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2009.05.044>
- International Technology Roadmap for PV. (2025, April). *16th Edition of the International Technology Roadmap for Photovoltaics (ITRPV)*.
- Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A. A., & Kim, K. H. (2018). Solar energy: Potential and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 894-900. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.094>
- Mallah, A. R., Saevarsdottir, G., Heuer, M., & Svavarsson, H. G. (2025). Advancing Sustainability in Solar-Grade Silicon Production: Enhanced Boron and Phosphorus Removal via Silicon Refining from Al-Si Melt: Mallah, Saevarsdottir, Heuer, and Svavarsson. *JOM*, 77(4), 2512-2526. <https://doi.org/10.1007/s11837-024-07114-z>
- Maurits, J. E. A. (2014). Silicon Production. In *Treatise on Process Metallurgy* (Vol. 3). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096988-6.00022-5>
- Méndez, L., Forniés, E., Garrain, D., Pérez Vázquez, A., Souto, A., & Vlasenko, T. (2021). Upgraded metallurgical grade silicon and polysilicon for solar electricity production: A comparative life cycle assessment. *Science of the Total Environment*, 789. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147969>
- Míguez Novoa, J. M., Hoffmann, V., Forniés, E., Méndez, L., Tojeiro, M., Ruiz, F., Funes, M., del Cañizo, C., Fuertes Marrón, D., Dasilva Villanueva, N., Caballero, L. J., Arkan, B., Turan, R., Canar, H. H., & Sánchez Plaza, G. (2024). Production of upgraded metallurgical-grade silicon for a low-cost, high-efficiency, and reliable PV technology. In *Frontiers in Photonics* (Vol. 5). Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/fphot.2024.1331030>
- Muliawati, F. D. (2025, September 18). Prabowo Targetkan 1 Desa Pasang 1,5 MW Listrik Panel Surya. <https://www.cnbcindonesia.com/news/20250918082753-4-668003/Prabowo-Targetkan-1-Desa-Pasang-15-Mw-Listrik-Panel-Surya>
- Peraturan Presiden Republik Indonesia. (2017). *Rencana Umum Energi Nasional*. [https://sipuu.setkab.go.id/PUUdoc/175146/Lampiran I Perpres Nomor 22 Tahun 2017.pdf](https://sipuu.setkab.go.id/PUUdoc/175146/Lampiran%20I%20Perpres%20Nomor%2022%20Tahun%202017.pdf)
- Presiden Republik Indonesia. (2025). *Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 1 Tahun 2025 tentang Satuan Tugas Percepatan Hilirisasi dan Ketahanan Energi Nasional*.
- Rahmah, N. N. (2025, October). *Prabowo targetkan bangun 100 GW PLTS, insentif dan dukungan regulasi jadi kunci*. Katadata.
- Ramírez-Márquez, C., Otero, M. V., Vázquez-Castillo, J. A., Martín, M., & Segovia-Hernández, J. G. (2018). Process design and intensification for the production of solar grade silicon. *Journal of Cleaner Production*, 170, 1579-1593. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.126>
- Reznichenko, M. (2016). Evolution of requirements for solar grade silicon. *Procedia Engineering*, 139, 41-46. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.09.223>
- Silalahi, D. F., Blakers, A., Stocks, M., Lu, B., Cheng, C., & Hayes, L. (2021). Indonesia's vast solar energy potential. *Energies*, 14(17), 5424. <https://doi.org/10.3390/en14175424>
- Sinovoltaics. (2021). *Polycrystalline Silicon Cells: production and characteristics*. <https://sinovoltaics.com/learning-center/solar-cells/polycrystalline-silicon-cells-production-and-characteristics/>
- Suhendra. (2020, March 23). *Polycrystalline Silicon - Proses Produksi Silicon untuk Solar Cell*. <https://www.youtube.com/watch?v=ICoo2P9ht8>
- Tiefel, H., & Friedrich Schaaf. (2019). *White Paper for Production of Mono- and Polycrystalline Silicon for Solar Cell Grade*.
- Walsh, S. T., Boylan, R. L., McDermott, C., & Paulson, A. (2005). The semiconductor silicon industry roadmap: Epochs driven by the dynamics between disruptive technologies and core competencies. *Technological Forecasting and Social Change*, 72(2), 213-236. [https://doi.org/10.1016/S0040-1625\(03\)00066-0](https://doi.org/10.1016/S0040-1625(03)00066-0)
- Wilson, G. M., Al-Jassim, M., Metzger, W. K., Glunz, S. W., Verlinden, P., Xiong, G., Mansfield, L. M., Stanbery, B. J., Zhu, K., Yan, Y., Berry, J. J., Ptak, A. J., Dimroth, F., Kayes, B. M., Tamboli, A. C., Peibst, R., Catchpole, K., Reese, M. O., Klinga, C. S., ... Sulas-Kern, D. B. (2020). The 2020 photovoltaic technologies roadmap. In *Journal of Physics D: Applied Physics* (Vol. 53, Issue 49). IOP Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab9c6a>
- Xakalashe, B. S., & Tangstad, M. (2011). Silicon processing : from quartz to crystalline silicon solar cells. *Southern African Pyrometallurgy*, March, 6-9.