

Kemajuan dan aplikasi superkonduktor modern berbasis silicon, germanium, karbon, dan MgB_2 : tinjauan literatur terbaru

Mannanu Minni Saelillah

Program studi Fisika, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang
e-mail: *220604110021@student.uin-malang.ac.id

Kata Kunci:

Superkonduktor, Karbon, Silikon, Germanium, MgB_2

Keywords:

Superconductor, Carbon, Silicon, Germanium, MgB_2

ABSTRAK

Superkonduktor adalah material dengan resistansi nol dan pengusiran medan magnet (Efek Meissner) di bawah suhu kritis tertentu. Sifat ini menjadikan superkonduktor sangat potensial untuk teknologi masa depan, termasuk transmisi daya tanpa rugi, perangkat elektronik hemat energi, dan aplikasi medis. Review ini membahas empat jenis superkonduktor non-konvensional: silikon, germanium, karbon, dan magnesium diborida (MgB_2). Kajian difokuskan pada sifat fisis, metode sintesis, serta aplikasinya berdasarkan literatur terbaru. Pencarian referensi dilakukan melalui database internasional dengan kata kunci “superconductor”, “silicon”, “germanium”, “carbon-based

superconductors”, dan “ MgB_2 ”. Hasil tinjauan menunjukkan bahwa MgB_2 memiliki kinerja paling stabil dengan suhu transisi sekitar 39 K, sedangkan silikon dan germanium memerlukan doping berat atau tekanan tinggi untuk mencapai superkonduktivitas. Karbon dalam bentuk nanotube dan fullerene menunjukkan potensi pada skala nano. Meskipun tantangan suhu transisi rendah dan metode sintesis kompleks masih ada, keempat material ini memiliki prospek besar untuk mendukung pengembangan aplikasi superkonduktor di bidang energi, elektronik, dan medis.

ABSTRACT

Superconductors are materials that exhibit zero electrical resistance and magnetic field expulsion (Meissner effect) below a critical temperature. These properties make them highly promising for future technologies, including lossless power transmission, energy-efficient electronics, and medical applications. This review focuses on four non-conventional superconductors: silicon, germanium, carbon, and magnesium diboride (MgB_2). The discussion highlights their physical properties, synthesis methods, and potential applications based on recent literature. References were collected from international databases using the keywords “superconductor,” “silicon,” “germanium,” “carbon-based superconductors,” and “ MgB_2 .” The findings show that MgB_2 exhibits the most stable performance with a transition temperature of about 39 K, while silicon and germanium require heavy doping or high pressure to display superconductivity. Carbon in the form of nanotubes and fullerenes demonstrates strong potential at the nanoscale. Despite challenges related to low transition temperatures and complex synthesis methods, all four materials show significant prospects for advancing superconducting applications in energy, electronics, and medicine.

Pendahuluan

Superkonduktivitas adalah fenomena fisik unik di mana material tidak menunjukkan resistansi listrik sama sekali saat didinginkan di bawah suhu kritis tertentu, yang dikenal sebagai suhu transisi superkonduktor. Sifat luar biasa ini memungkinkan material untuk mengalirkan arus listrik tanpa kehilangan energi sama sekali, sehingga superkonduktor sangat diperlukan dalam berbagai aplikasi teknologi canggih. Superkonduktor



This is an open access article under the CC BY-NC-SA license.

Copyright © 2023 by Author. Published by Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.

menawarkan kemungkinan yang berharga dan penting bagi teknologi canggih di berbagai sektor, seperti tenaga listrik, magnet medan tinggi, energi, kedokteran, sains, industri, dan transportasi (Yao, C., & Ma, Y, 2021).

Superkonduktivitas adalah fenomena kuantum yang pertama kali ditemukan oleh fisikawan Belanda, Heike Kamerlingh Onnes, pada tahun 1911. Penemuan ini menjadi titik balik yang signifikan dalam dunia sains, karena superkonduktivitas menawarkan kemungkinan untuk menciptakan sistem konduksi listrik yang sepenuhnya bebas dari resistansi. Hal ini berpotensi menghasilkan penghematan energi yang sangat besar, yang dapat berdampak positif pada berbagai sektor industri dan teknologi. Material superkonduktor, yang memiliki kemampuan untuk menghantarkan listrik tanpa kehilangan energi, telah diterapkan dalam berbagai aplikasi praktis. Contohnya, dalam bidang medis, superkonduktor digunakan dalam mesin pencitraan resonansi magnetik (MRI) yang memungkinkan diagnosis yang lebih akurat. Selain itu, dalam fisika partikel, akselerator partikel memanfaatkan sifat superkonduktor untuk mempercepat partikel hingga kecepatan yang sangat tinggi. Kereta maglev, yang menggunakan teknologi levitasi magnetik, juga merupakan salah satu contoh aplikasi superkonduktor yang menunjukkan potensi transportasi yang cepat dan efisien (Shrivastava, 2020).

Namun, meskipun superkonduktor konvensional seperti niobium-titanium (NbTi) dan yttrium barium tembaga oksida (YBCO) telah memberikan kontribusi besar dalam pengembangan teknologi, mereka masih memiliki beberapa keterbatasan. Salah satu tantangan utama adalah suhu kritis yang rendah, yang berarti bahwa material ini hanya dapat berfungsi sebagai superkonduktor pada suhu yang sangat dingin, sering kali mendekati nol mutlak. Selain itu, biaya produksi yang tinggi untuk material superkonduktor ini menjadi hambatan dalam penerapan yang lebih luas. Oleh karena itu, penelitian terus dilakukan untuk menemukan material superkonduktor baru yang dapat beroperasi pada suhu yang lebih tinggi dan dengan biaya yang lebih efisien yang mulai mengarah pada material alternatif berbasis unsur kelompok IV seperti Si, Ge, dan C, serta logam ringan seperti MgB₂.

Silikon dan germanium, sebagai semikonduktor yang umum digunakan, telah menarik perhatian para peneliti untuk dikembangkan lebih lanjut sebagai superkonduktor. Penelitian ini bertujuan untuk memahami bagaimana modifikasi struktural dan doping dapat meningkatkan sifat superkonduktor dari material ini. Di sisi lain, karbon, terutama dalam bentuk grafena, menunjukkan potensi yang menjanjikan dalam aplikasi superkonduktor berkat sifat konduktivitasnya yang luar biasa dan fleksibilitasnya (Tayaba et al., 2023). MgB₂, yang ditemukan sebagai superkonduktor pada tahun 2001, juga telah menjadi fokus penelitian karena kemampuannya untuk beroperasi pada suhu yang lebih tinggi dibandingkan dengan superkonduktor konvensional (Savaskan et al., 2023). Topik ini sangat penting untuk masa depan karena superkonduktor memiliki potensi untuk mengubah cara memproduksi, menyimpan, dan mentransmisikan energi. Dengan meningkatnya permintaan akan energi terbarukan dan sistem transportasi yang lebih efisien, superkonduktor dapat memainkan peran kunci dalam mengurangi kehilangan energi dan meningkatkan efisiensi sistem kelistrikan.

Tujuan dari review ini adalah untuk memberikan tinjauan komprehensif mengenai kemajuan terbaru dalam penelitian superkonduktor berbasis silikon, germanium,

karbon, dan MgB₂. Review ini akan mencakup analisis sifat fisik dan kimia dari material tersebut, serta aplikasi potensialnya dalam berbagai bidang, termasuk energi, elektronik, dan teknologi kuantum. Dengan mengumpulkan dan menganalisis literatur terbaru, diharapkan review ini dapat memberikan wawasan yang berguna bagi peneliti dan praktisi dalam mengembangkan teknologi superkonduktor yang lebih efisien dan berkelanjutan.

Pembahasan

Hasil yang didapatkan setelah menganalisis kelima jurnal yaitu Superkonduktor berbasis unsur-unsur kelompok IV seperti silikon (Si), germanium (Ge), dan karbon (C) memiliki struktur kovalen yang kuat, namun secara alami bukan superkonduktor. Superkonduktivitas hanya muncul setelah doping berat atau rekayasa tekanan tinggi diterapkan. Berbeda dengan MgB₂ yang secara alami merupakan superkonduktor konvensional dengan suhu transisi cukup tinggi (39 K), dan mudah diproduksi dalam bentuk bulk serta tape (Shrivastava, 2020). Tabel 1 di bawah ini menunjukkan perbandingan nilai suhu transisi kritis (T_c), metode doping, dan tipe struktur kristal dari beberapa material superkonduktor: (Tayaba et al., 2023) (Yao, C., & Ma, Y, 2021) (Ersoz et al., 2025) (Savaskan et al., 2023)

Tabel 1. Perbandingan Nilai Suhu transisi kritis (T_c), metode doping, dan tipe struktur kristal dari beberapa material superkonduktor

Material	Suhu Transisi T _c (K)	Doping/Metode	Struktur Kristal	Sifat Khusus
Silicon (Si)	0.6–8 K	Boron berat	FCC / clathrate	Perlu doping boron / tekanan >10 GPa
Germanium (Ge)	1.2–6.7 K	Gallium berat	Diamond Cubic / β-tin	Rentan terhadap cacat, T _c rendah
Carbon (C)	4–40 K	Na, K, Rb doping	Fullerene, Nanotube	T _c tinggi pada doping alkali dan struktur 1D
MgB ₂	~39 K	Boron murni	Hexagonal AlB ₂ -type	Superkonduktor komersial, mudah difabrikasi

Sumber: (Tayaba et al., 2023) (Yao, C., & Ma, Y, 2021) (Ersoz et al., 2025) (Savaskan et al., 2023)

Karakteristik material sangat menentukan kelayakan aplikasi industri. MgB₂ dan C-doped structures menunjukkan performa unggul dalam hal suhu transisi tinggi dan kemudahan rekayasa bentuk, sedangkan Si dan Ge menjanjikan sisi kompatibilitas

dengan industri semikonduktor, meski T_c -nya rendah. Ersoz et al. (2025) menekankan pentingnya additive manufacturing (3D printing) dalam pembuatan superkonduktor bentuk kompleks, khususnya YBCO dan MgB_2 . Teknologi ini mampu menciptakan struktur mikro presisi tinggi yang tidak bisa dicapai dengan metode konvensional. Savaskan et al. (2023) menunjukkan bahwa jenis dan kemurnian boron dalam sintesis MgB_2 sangat mempengaruhi performa levitasi magnetik. Boron kualitas industri dapat menghasilkan performa levitasi yang kompetitif jika diproses dengan benar. High-Pressure High-Temperature (HPHT) digunakan pada silicon dan germanium untuk menginduksi fase superkonduktor. Chemical Vapor Deposition (CVD) banyak digunakan pada berlian dopan boron dan nanotube karbon (Tayaba et al., 2023). Kemudian yang terakhir ada ion implantation + annealing digunakan untuk doping berat pada Ge:Ga dan Si:B yang mampu meningkatkan T_c (Yao, C., & Ma, Y, 2021).

Tabel 2 di bawah ini menunjukkan keunggulan dan kelemahan dari metode sintesis dari setiap material

Material	Metode Sintesis	Keunggulan	Kelemahan
Si:B	Gas immersion laser doping	Kompatibel dengan chip	T_c sangat rendah (0.4–0.6 K)
Ge:Ga	Ion implantation + thermal anneal	Peningkatan T_c hingga 1.2 K	Sulit dikontrol presisi doping
C ₆₀	Alkali doping (e.g., Cs, K)	T_c hingga 40 K	Tidak stabil dalam lingkungan terbuka
MgB_2	Solid-state reaction / AM	Sederhana, murah, scalable	Mudah teroksidasi

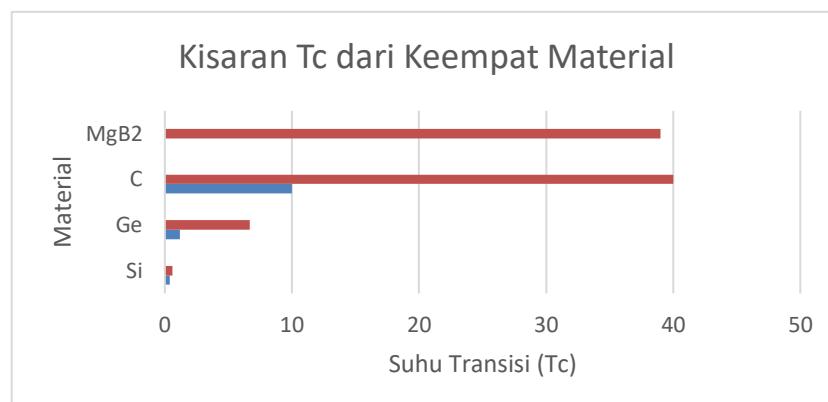
Menurut Tayaba et al. (2023), superkonduktor berbasis Si, Ge, dan C menjanjikan untuk aplikasi medis dan elektronik berdaya rendah karena sifatnya yang ringan, fleksibel, dan kompatibel secara biologi. Graphene dan fullerene, sebagai contoh, telah diuji dalam biosensor dan perangkat diagnostic. MgB_2 digunakan dalam pengembangan sistem MRI suhu menengah dan kereta levitasi magnetik, karena gaya pinning magnetiknya yang tinggi (Savaskan et al., 2023). Selain itu, Shrivastava (2020) mendeskripsikan berbagai komponen infrastruktur energi dan transportasi seperti kabel, trafo, dan motor yang sudah diuji dengan superkonduktor HTS dan MgB_2 . Tabel 3 berikut merangkum aplikasi-aplikasi utama dari keempat material tersebut

Tabel 3. Aplikasi Utama dari Keempat Material

Material	Aplikasi Utama	Keunggulan
----------	----------------	------------

Silicon	Sirkuit superkonduktor	Integrasi CMOS, stabil
Germanium	Logika optoelektronik	Mobilitas tinggi, sensitivitas tinggi
Carbon	Biosensor, transistor kuantum	Fleksibel, ringan, biokompatibel
MgB ₂	MRI, motor, kereta maglev	Tc tinggi, murah, levitasi kuat

Meskipun potensinya besar, masih banyak tantangan dalam pengembangan superkonduktor ini. Tc yang rendah pada Si dan Ge membatasi aplikasi praktis tanpa pendinginan ekstrem. Proses doping dan tekanan tinggi juga menambah kompleksitas produksi. Sementara itu, karbon berbasis superkonduktor memerlukan kontrol ketat terhadap struktur nano untuk mempertahankan sifat superkonduktivitasnya. Masih diperlukan standarisasi metode sintesis dan karakterisasi material ini untuk aplikasi massal Tayaba et al. (2023). Studi sebelumnya seperti oleh Tayaba et al. (2023) menunjukkan peningkatan Tc pada Si melalui doping boron dan fabrikasi struktur nano, namun prosesnya masih jauh dari efisien.



Grafik 1 Perbandingan Suhu Transisi Antar Material

Dari literatur yang dianalisis, ada beberapa hal penting yang muncul:

1. Dominasi riset MgB₂ dan C-based untuk aplikasi praktis karena nilai Tc yang tinggi dan bahan lebih murah.
2. Si dan Ge masih banyak dikaji dalam konteks integrasi ke sistem elektronik dan kuantum, bukan untuk daya besar.
3. Tantangan umum pada semua materia yaitu sintesis stabil, peningkatan Tc, dan pengendalian struktur mikro

Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan hasil telaah literatur terhadap superkonduktor berbasis silikon, germanium, karbon, dan magnesium diboride (MgB₂), dapat disimpulkan bahwa MgB₂ adalah material superkonduktor paling potensial untuk aplikasi industri besar seperti sistem levitasi magnetik dan perangkat medis (MRI), karena memiliki suhu transisi (Tc) tinggi (~39 K), struktur kristal sederhana, dan proses sintesis yang ekonomis. Karbon, dalam bentuk fullerene dan nanotube, menunjukkan sifat superkonduktor dengan Tc

mencapai 40 K, serta memiliki potensi besar di bidang nanoelektronik dan biosensor karena ringan, fleksibel, dan tidak toksik. Silikon dan germanium memiliki T_c yang rendah dan hanya dapat menjadi superkonduktor dengan doping berat atau tekanan tinggi. Namun, karena kompatibilitasnya dengan proses fabrikasi semikonduktor konvensional, keduanya sangat menarik untuk aplikasi elektronik suhu rendah, komputasi kuantum, dan detektor presisi tinggi. Tantangan yang masih dihadapi meliputi peningkatan suhu transisi, stabilitas struktur, dan efisiensi proses sintesis. Penelitian masa depan sebaiknya difokuskan pada rekayasa struktur nano (1D/2D), penggunaan teknologi fabrikasi aditif (AM), optimasi doping dan tekanan dan integrasi dengan sistem elektronik eksisting. Dengan tren riset dan teknologi yang berkembang cepat, keempat jenis material ini memiliki prospek besar untuk dikembangkan menjadi superkonduktor masa depan yang efisien, ringan, dan kompatibel dengan kebutuhan elektronik modern serta teknologi energi bersih.

Daftar Pustaka

- Ersoz, T. T., Mohamed, A. E.-M. A., & Attallah, M. M. (2025). Additive Manufacturing of Superconductors: Opportunities and Challenges. *Materials Research Bulletin*, 161, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2025.113448>
- Nuryadin, B. W. (2020). Pengantar Fisika Nanomaterial: Teori dan Aplikasi.
- Shrivastava, S. K. (2020). Applications of superconductivity in electric power and transportation system. *Journal of Engineering Sciences*, 11(4), 203–210. <https://www.researchgate.net/publication/340547260>
- Savaskan, b. Et al. (2023). Bulk mgb_2 superconductor for levitation applications fabricated with boron processed by different routes. *Journal of alloys and compounds*, 961. <Https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.170893>
- Tayaba, S. et al. (2023). Silicon-Germanium and Carbon-Based Superconductors for Electronic, Industrial, and Medical Applications. *Materials Science & Engineering B*, 290. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2023.116332>
- Yao, C., & Ma, Y. (2021). Superconducting materials: Challenges and opportunities for large-scale applications. *iScience*, 24(6), 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102541>