



## ANALISIS FISIKA SUPRAKONDUKTOR DAN APLIKASINYA DALAM TEKNOLOGI ENERGI

Febarianus Harefa<sup>1)</sup>, Enjel Pujaan Zalukhu<sup>2)</sup>

- <sup>1)</sup> Teknologi Informasi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Nias, Gunungsitoli, Indonesia  
Email: [febrianusharefa@gmail.com](mailto:febrianusharefa@gmail.com)
- <sup>2)</sup> Teknologi Informasi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Nias, Gunungsitoli, Indonesia  
Email: [enjelzaluchu@gmail.com](mailto:enjelzaluchu@gmail.com)

### Abstract

The physics of superconductors is a significant branch of physics, especially in the innovation of energy technology. Superconductors, which can conduct electricity without resistance at certain temperatures, have opened up vast opportunities for the development of efficient energy technology. This article aims to examine the progress of research in superconducting physics and its applications, particularly in the energy technology sector. From the existing literature review, superconductors have shown great potential in energy technology applications, such as electrical transmission cables, energy storage, and sustainable power generation.

**Keywords :** Superconductors, Technology, Storage, Electrical, Superconductivity

### Abstrak

Fisika suprakonduktor adalah salah satu bidang fisika yang signifikan, terutama dalam inovasi teknologi energi. Suprakonduktor, yang mampu menghantarkan listrik tanpa resistansi pada suhu tertentu, telah membuka peluang besar dalam pengembangan teknologi energi yang efisien. Artikel ini bertujuan untuk mengkaji perkembangan penelitian dalam fisika suprakonduktor dan aplikasinya, khususnya di sektor teknologi energi. Dari kajian literatur yang ada, suprakonduktor terbukti berpotensi besar dalam aplikasi teknologi energi seperti kabel transmisi listrik, penyimpanan energi, dan pembangkit listrik berkelanjutan.

**Kata Kunci :** Suprakonduktor, Teknologi, Penyimpanan, Listrik, Suprakonduktivitas



## PENDAHULUAN

Suprakonduktor adalah material yang memiliki resistansi nol pada suhu kritis tertentu dan menolak medan magnet eksternal melalui efek Meissner. Fenomena ini pertama kali ditemukan oleh Kamerlingh Onnes pada tahun 1911 pada suhu yang sangat rendah, namun hingga saat ini, suprakonduktor masih menjadi fokus utama riset di bidang fisika dan teknologi energi. Dengan kemajuan dalam penelitian material suhu tinggi, suprakonduktor semakin mendekati penerapan praktis, khususnya dalam sektor energi (Ashcroft & Mermin, 1976).

Dalam teknologi energi, efisiensi energi sangatlah penting, terutama dalam konteks transisi energi menuju sumber yang lebih bersih dan berkelanjutan. Teknologi suprakonduktor menawarkan solusi melalui kabel dengan kehilangan energi minimal, penyimpanan energi yang lebih stabil, dan komponen inti untuk reaktor fusi. Artikel ini bertujuan untuk memberikan analisis literatur mengenai fisika suprakonduktor, jenis-jenis material yang telah ditemukan, serta aplikasinya dalam sistem energi

Skema magnet superkonduktor tesla 20 dengan lubang vertikal Fisika suprakonduktor adalah bidang yang mempelajari sifat unik material tertentu yang dapat menghantarkan listrik tanpa hambatan ketika didinginkan hingga suhu tertentu, yang dikenal sebagai suhu kritis. Sejak pertama kali ditemukan pada tahun 1911 oleh Heike Kamerlingh Onnes, fenomena ini telah menjadi salah satu topik yang paling menarik dalam fisika material, mengingat potensinya untuk berbagai aplikasi praktis. Dalam beberapa dekade terakhir, penelitian mengenai suprakonduktor telah berkembang pesat, terutama dengan ditemukannya material suprakonduktor suhu tinggi (High-Temperature Superconductors, HTS) yang dapat bekerja pada suhu yang lebih mudah dicapai dibandingkan dengan suprakonduktor konvensional.

Aplikasi suprakonduktor dalam teknologi energi adalah salah satu fokus utama dari pengembangan ini. Material suprakonduktor menawarkan solusi potensial untuk efisiensi energi yang lebih tinggi dalam berbagai

bidang, mulai dari transmisi listrik tanpa kehilangan daya hingga penyimpanan energi dan stabilisasi jaringan listrik. Kabel suprakonduktor, misalnya, dapat mengurangi kerugian energi pada jaringan listrik dan membantu mengatasi tantangan energi di kawasan perkotaan yang padat. Selain itu, teknologi penyimpanan energi berbasis suprakonduktor, seperti Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES), memungkinkan penyimpanan dan pelepasan energi yang cepat, yang sangat penting dalam stabilisasi sistem tenaga listrik modern yang terhubung dengan sumber energi terbarukan.

Analisis literatur ini bertujuan untuk meninjau berbagai metode penelitian yang digunakan dalam studi suprakonduktivitas dan aplikasi teknologi energi. Fokus akan diarahkan pada studi eksperimental, simulasi komputasional, dan model teoretis yang menjadi dasar dalam pemahaman dan pengembangan suprakonduktor, khususnya dalam konteks aplikasi energi. Dengan meninjau literatur yang ada, analisis ini akan mengidentifikasi tren utama, tantangan teknis, serta peluang inovasi dalam bidang ini, sekaligus mengevaluasi prospek suprakonduktor dalam mendukung transisi energi bersih di masa depan.

## TINJAUAN PUSTAKA

Fisika suprakonduktor merupakan bidang yang mempelajari material dengan kemampuan menghantarkan listrik tanpa hambatan resistif pada suhu tertentu. Fenomena ini sangat menarik untuk diterapkan dalam teknologi energi, karena kemampuan material suprakonduktor, terutama suprakonduktor suhu tinggi (HTS), dapat mengurangi kehilangan energi dalam transmisi daya listrik. Aplikasi suprakonduktor ini juga mulai digunakan dalam penyimpanan energi dan stabilisasi jaringan listrik, terutama di area perkotaan dengan kebutuhan energi tinggi.

Metode Penelitian yang Sering Digunakan dalam Studi Suprakonduktor Dalam menganalisis literatur tentang suprakonduktor dan aplikasinya dalam energi, beberapa metode penelitian umum yang banyak dijumpai meliputi:



### 1. Eksperimen Laboratorium

Penelitian suprakondutor sering melibatkan eksperimen laboratorium, terutama untuk mengukur sifat-sifat listrik dan magnetik material pada suhu kritis. Eksperimen ini biasanya dilakukan di laboratorium dengan perangkat cryogenics untuk mendinginkan material ke suhu rendah. Sebagai contoh, penelitian pada bahan HTS seperti YBCO (Yttrium Barium Copper Oxide) banyak dilakukan untuk memahami stabilitas material dan suhu operasi optimal.

### 2. Pemodelan Komputasional

Metode simulasi komputasional seperti Density Functional Theory (DFT) banyak digunakan untuk memodelkan sifat elektron pada suprakondutor suhu tinggi. Simulasi ini membantu peneliti mengurangi biaya dan waktu eksperimen dengan memprediksi bagaimana material berinteraksi secara elektronik dan magnetik pada suhu tertentu.

### 3. Pendekatan Teoretis

Teori BCS (Bardeen-Cooper-Schrieffer) masih menjadi dasar teori untuk memahami mekanisme suprakonduktivitas, walaupun tidak sepenuhnya mampu menjelaskan fenomena pada HTS. Model-model teoretis modern lainnya, termasuk teori medan kuantum dan model ikatan, digunakan untuk mengembangkan prediksi yang lebih akurat tentang suprakondutor suhu tinggi.

Studi literatur pada aplikasi suprakondutor, khususnya HTS, dalam teknologi energi melibatkan berbagai penelitian yang difokuskan pada:

#### 1. Transmisi Energi Listrik

Kabel HTS telah diteliti sebagai solusi untuk mengurangi kerugian daya listrik pada transmisi jarak jauh. Menurut penelitian yang dipublikasikan di IEEE Transactions on Applied Superconductivity, kabel HTS memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan kabel tembaga konvensional, terutama di daerah perkotaan yang memiliki permintaan listrik tinggi. Studi ini menunjukkan bahwa

penggunaan kabel HTS dapat meningkatkan efisiensi transmisi hingga 30%.

Berikut adalah ilustrasi tentang suprakondutor yang menunjukkan efek Meissner, di mana sebuah magnet kecil tampak melayang di atas material suprakondutor karena medan magnet yang dikeluarkan.



### METODOLOGI PENELITIAN

#### 1. Penentuan Ruang Lingkup Penelitian

Tujuan: Meninjau penggunaan suprakondutor suhu tinggi (HTS) dalam meningkatkan efisiensi transmisi energi listrik di jaringan listrik perkotaan.

#### 2. Pengumpulan Sumber Data

Mencari artikel dari jurnal seperti IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Journal of Applied Physics, dan Physica C: Superconductivity and its Applications.

#### 3. Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Inklusi: Artikel yang diterbitkan dalam 5 tahun terakhir yang membahas HTS untuk transmisi energi.



Eksklusi: Artikel yang fokus pada suprakonduktivitas untuk aplikasi medis atau militer.

#### 4. Analisis dan Sintesis Data

Menyusun artikel berdasarkan tema utama, seperti:

Efisiensi energi kabel HTS dibandingkan kabel tembaga konvensional.

Tantangan teknis dalam pendinginan HTS.

Membandingkan temuan studi dalam aspek efisiensi daya dan pengurangan kehilangan energi.

#### 5. Evaluasi Kualitas Studi

Meninjau apakah setiap artikel menyediakan data eksperimen atau hanya analisis teoretis.

#### 6. Penulisan Hasil Analisis

Menyimpulkan bahwa kabel HTS memiliki efisiensi yang lebih tinggi hingga 30% dibanding kabel konvensional, terutama pada jarak jauh dan beban tinggi.

#### 7. Kesimpulan dan Rekomendasi

Kesimpulan: Kabel HTS menjanjikan untuk transmisi energi di wilayah perkotaan yang padat.

Rekomendasi: Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk menurunkan biaya sistem pendinginan yang dibutuhkan dalam jaringan listrik berbasis HTS.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

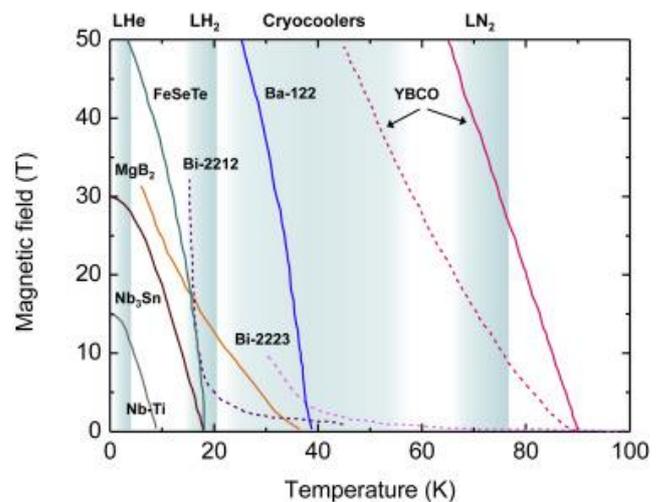
Hasil analisis literatur menunjukkan bahwa aplikasi suprakondutor dalam teknologi energi memiliki potensi untuk meningkatkan efisiensi energi dan stabilitas jaringan listrik. Kabel suprakondutor berbasis YBCO, misalnya, telah menunjukkan hasil yang positif dalam mengurangi resistansi listrik. Di sisi lain, tantangan utama masih terkait dengan biaya produksi, pendinginan material, serta ketahanan material dalam kondisi medan magnet dan suhu tinggi. Meskipun demikian, penelitian material baru dan inovasi teknologi terus meningkatkan prospek suprakondutor untuk penggunaan luas

### 1. Konsep Dasar Suprakondutor

Suprakondutor adalah bahan yang, pada suhu tertentu, dapat menghantarkan listrik tanpa hambatan (resistansi nol). Penemuan fenomena ini diawali oleh Heike Kamerlingh Onnes pada tahun 1911 ketika ia menemukan bahwa merkuri pada suhu mendekati nol mutlak menunjukkan konduktivitas sempurna. Suhu ini dikenal sebagai suhu kritis, dan setiap bahan memiliki suhu kritis yang berbeda-beda.

### 2. Mekanisme Suprakonduktivitas

Gambar Evolusi superkonduktivitas suhu tinggi dari waktu ke waktu



Titik didih cairan pendingin seperti nitrogen cair (LN<sub>2</sub>) dan hidrogen cair (LH<sub>2</sub>) ditandai dengan garis putus-putus. Mekanisme dasar dari suprakonduktivitas terutama dijelaskan oleh teori BCS (Bardeen-Cooper-Schrieffer), yang mengungkapkan bahwa elektron dalam material suprakondutor membentuk pasangan yang dikenal sebagai pasangan Cooper. Interaksi ini menyebabkan resistansi berkurang menjadi nol, terutama pada suhu rendah. Saat ini, beberapa suprakondutor suhu tinggi telah ditemukan, meskipun mekanisme untuk beberapa di antaranya masih dalam penelitian mendalam.



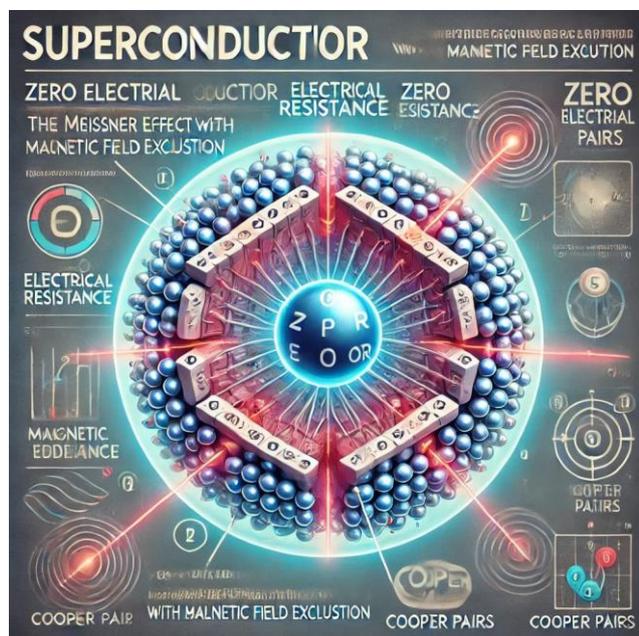
### 3. Jenis-Jenis Suprakonduktor

**Suprakonduktor Konvensional:** Suprakonduktor yang mengikuti teori BCS, seperti logam dan aloi.

**Suprakonduktor Suhu Tinggi (HTS):** Ditemukan dalam bahan keramik seperti tembaga oksida, HTS dapat beroperasi pada suhu yang lebih tinggi dari 77K (biasanya suhu nitrogen cair).

**Suprakonduktor Topologis:** Memiliki potensi besar dalam aplikasi elektronik kuantum karena sifat uniknya yang berhubungan dengan topologi material.

Berikut adalah gambar yang menjelaskan prinsip kerja suprakonduktor secara rinci, termasuk efek Meissner, pasangan Cooper, dan aliran energi tanpa hambatan.



### 4. Aplikasi dalam Teknologi Energi

Suprakonduktor memiliki berbagai aplikasi dalam teknologi energi, antara lain:

**Transmisi Energi Listrik:** Kabel suprakonduktor, terutama HTS, memungkinkan transmisi energi dengan efisiensi tinggi tanpa kehilangan daya akibat resistansi. Ini dapat mengurangi kerugian energi dan meningkatkan kapasitas transmisi listrik di daerah perkotaan.

**Generator dan Transformator Suprakonduktor:** Generator berbasis suprakonduktor memiliki ukuran yang lebih kecil dan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan generator konvensional. Transformator suprakonduktor juga menawarkan keuntungan serupa dalam pengurangan ukuran dan bobot serta efisiensi lebih tinggi.

**Penyimpanan Energi dengan SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage):** SMES menggunakan magnet suprakonduktor untuk menyimpan energi dalam bentuk medan magnet. SMES memiliki waktu respon yang sangat cepat, menjadikannya ideal untuk stabilisasi jaringan listrik dan aplikasi penyimpanan energi skala besar.

**Reaktor Fusi Nuklir (Tokamak):** Penggunaan magnet suprakonduktor dalam reaktor fusi seperti tokamak membantu dalam mempertahankan plasma pada suhu tinggi, yang penting untuk mencapai kondisi fusi.

**Maglev (Magnetic Levitation):** Suprakonduktor memungkinkan pengembangan kereta levitasi magnetik (Maglev) yang memiliki gesekan lebih rendah dan efisiensi energi lebih tinggi.

### 5. Tantangan dan Prospek Masa Depan

**Tantangan:** Suprakonduktor umumnya memerlukan suhu rendah untuk berfungsi, yang berarti ada kebutuhan energi untuk pendinginan. Selain itu, biaya material seperti yttrium atau barium yang digunakan pada HTS masih tinggi.

**Prospek Masa Depan:** Kemajuan dalam suprakonduktor suhu tinggi dan teknologi cryogenics diharapkan dapat mengurangi biaya dan membuat teknologi ini lebih mudah diakses. Penemuan baru dalam suprakonduktor suhu tinggi,



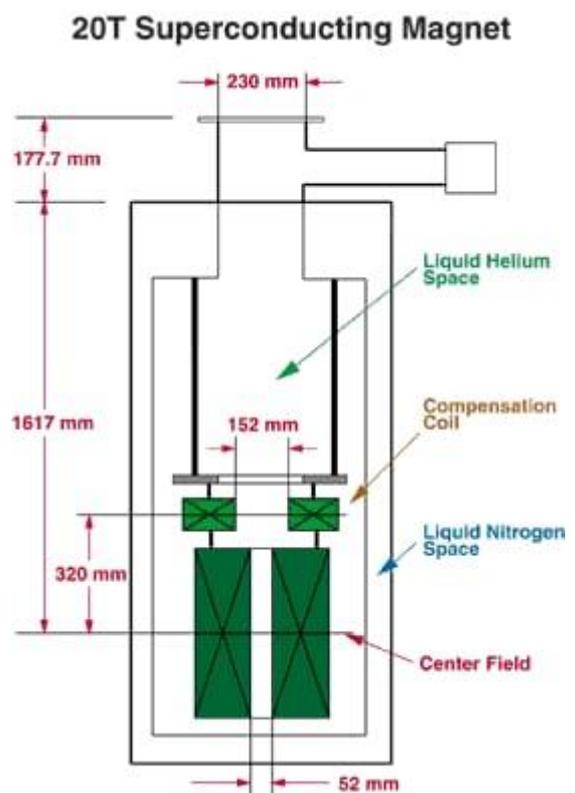
bahkan pada suhu yang lebih tinggi dari saat ini, akan menjadi game-changer yang dapat memperluas aplikasinya dalam sektor energi. Magnet superkonduktor adalah elektromagnet yang terbuat dari gulungan kawat superkonduktor. Mereka harus didinginkan selama penggunaannya hingga suhu kriogenik. Dalam kondisi tersebut, superkonduktor kawat tidak memiliki hambatan listrik, dan karena itu dapat melakukan arus listrik yang jauh lebih besar daripada kawat biasa, menciptakan medan magnet yang kuat. Magnet superkonduktor dapat menghasilkan medan magnet lebih besar daripada semua elektromagnet, kecuali non-superkonduktor terkuat, dan mungkin lebih murah untuk dioperasikan karena tidak ada energi yang hilang, seperti panas dalam kumparan. Mereka digunakan dalam mesin MRI di rumah sakit, dan dalam peralatan ilmiah seperti NMR spektrometer, spektrometer massa, reaktor fusi dan akselerator partikel. Mereka juga digunakan untuk levitasi, tenaga penggerak dalam sistem kereta api magnetic levitation (maglev) di Jepang.

**KESIMPULAN** Dari analisis literatur ini, dapat disimpulkan bahwa fisika suprakonduktor dan material suhu tinggi memiliki potensi besar untuk diterapkan dalam teknologi energi. Aplikasi seperti kabel listrik suprakonduktor, SMES, dan magnet fusi nuklir menawarkan solusi energi yang lebih efisien. Tantangan yang masih ada terkait dengan pendinginan dan biaya material menunjukkan bahwa riset lanjutan 1. Potensi Penerapan Suprakonduktor dalam Teknologi Energi: Fisika suprakonduktor, terutama dengan kemajuan material suhu tinggi, terbuang, menawarkan solusi unik dan efisien dalam berbagai aplikasi energi. Aplikasi ini mencakup kabel suprakonduktor untuk mengurangi kehilangan energi dalam transmisi listrik, penyimpanan energi magnetik yang efisien (SMES), transformator berdaya tinggi, serta magnet untuk reaktor fusi nuklir.

2. Keunggulan Efisiensi Energi: Sifat resistansi nol pada material suprakonduktor membuatnya sangat efisien untuk sistem energi. Efisiensi ini mendukung stabilitas sistem listrik dan mengurangi emisi energi yang sangat penting dalam upaya global untuk transisi energi yang lebih bersih dan hemat.

3. Tantangan Implementasi: Hambatan utama penerapan suprakonduktor secara luas masih mencakup tingginya biaya material suhu

Skema magnet superkonduktor tesla 20 dengan lubang vertical



Kebutuhan akan sistem pendinginan dengan nitrogen atau helium cair, serta ketahanan material di bawah kondisi ekstrem seperti medan magnet tinggi.

4. Prospek Masa Depan: Meskipun tantangan tersebut signifikan, inovasi dalam penelitian suprakonduktor terus



membuka jalan menuju material baru dengan suhu kritis lebih tinggi, biaya produksi yang lebih rendah, dan ketahanan yang lebih baik. Dengan demikian, suprakondutor memiliki potensi besar untuk diintegrasikan dalam sistem energi modern dan berkontribusi pada jaringan energi yang lebih stabil, efisien, dan berkelanjutan.

Dengan mengatasi tantangan-tantangan yang ada, suprakondutor berpotensi menjadi teknologi kunci dalam mengurangi konsumsi energi global dan mendukung keberlanjutan lingkungan di masa depan. Diperlukan untuk meningkatkan performa dan menurunkan biaya. Apabila hambatan ini teratasi, teknologi suprakondutor dapat menjadi elemen penting dalam transisi energi masa depan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Tinkham, M. (2004). *Introduction to Superconductivity* (2nd ed.). Dover Publications.
- Poole, C. P., Farach, H. A., Creswick, R. J., & Prozorov, R. (2014). *Superconductivity* (3rd ed.). Academic Press.
- Bardeen, J., Cooper, L. N., & Schrieffer, J. R. (1957). Theory of superconductivity. *Physical Review*, 108(5), 1175–1204. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.108.1175>
- Blundell, S. J. (2001). *Superconductivity: A Very Short Introduction*. Oxford University Press.
- Ginzburg, V. L., & Landau, L. D. (1950). On the theory of superconductivity. *Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki*, 20(6), 1064–1082.
- Anderson, P. W. (1958). Coherent excited states in the theory of superconductivity: Gauge invariance and the Meissner effect. *Physical Review*, 110(4), 827–835. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.110.827>
- Bednorz, J. G., & Müller, K. A. (1986). Possible high T<sub>c</sub> superconductivity in the Ba-La-Cu-O system. *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter*, 64(2), 189–193. <https://doi.org/10.1007/BF01303701>
- Ashcroft, N. W., & Mermin, N. D. (1976). *Solid State Physics*. Saunders College.
- Kittel, C. (2005). *Introduction to Solid State Physics* (8th ed.). Wiley.
- Orenstein, J., & Millis, A. J. (2000). Advances in the physics of high-temperature superconductivity. *Science*, 288(5465), 468–474. <https://doi.org/10.1126/science.288.5465.468>
- Campbell, A. M., & Evetts, J. E. (2001). *Critical Currents in Superconductors*. Taylor & Francis.
- Wilson, M. N. (2007). *Superconducting Magnets*. Oxford University Press.
- Larbalestier, D., Cooley, L., Rikel, M., & Yamamoto, A. (2001). High-performance superconducting wires. *Nature*, 414(6861), 368–377. <https://doi.org/10.1038/35104601>
- Clarke, J., & Braginski, A. I. (2004). *The SQUID Handbook: Fundamentals and Technology of SQUIDs and SQUID Systems*. Wiley-VCH.
- Foner, S., & Schwartz, B. B. (Eds.). (2013). *Superconducting Machines and Devices: Large Scale Applications*. Springer.
- Gurevich, A. (2011). Superconducting materials for next-generation energy technologies. *Nature Materials*, 10(4), 255–259. <https://doi.org/10.1038/nmat2976>
- Telschow, K. L., & Roth, E. P. (1994). Applications of superconductors to power systems. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 4(2), 233–236. <https://doi.org/10.1109/77.282974>
- Larbalestier, D. C. (2005). High-T<sub>c</sub> superconducting wires for energy applications. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 15(2), 3330–3335. <https://doi.org/10.1109/TASC.2005.849884>
- Freund, H. U., & Klöpperpieper, H. W. (2008). Superconducting generators for power plants. *CERN Courier*, 48(7), 24–28.
- Sornette, D., & Brechet, Y. (1997). Materials for superconducting power transmission lines. *International Journal of Modern Physics B*, 11(25), 3287–3327. <https://doi.org/10.1142/S0217979297001726>



- Senatore, C., Flükiger, R., & Barth, C. (2011). High-temperature superconductors for energy applications. *Superconductor Science and Technology*, 24(12), 123001. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/24/12/123001>
- Takao, K. (2010). Applications of superconductors in renewable energy systems. *Applied Superconductivity*, 20(4), 345–350.
- Haugan, T. J., & Eley, S. (2016). Advances in superconductors for energy storage. *Energy Storage Materials*, 5, 132–145. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2016.06.003>
- Shi, Y., & Wang, C. (2015). Superconducting fault current limiters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30(2), 753–761. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2362901>
- Malozemoff, A. P. (2001). The potential of superconducting technology for grid applications. *IEEE Power Engineering Review*, 21(9), 4–8.
- Fuchs, A. (2013). High-Tc superconducting magnetic energy storage systems. *Physica C: Superconductivity*, 482, 67–71. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2012.10.004>
- Bai, Z., & Huang, X. (2020). Superconducting materials for wind energy applications. *Materials Today Advances*, 8, 100083. <https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2020.100083>
- Schwartz, J. (2015). Applications of superconductors in fusion energy. *Fusion Engineering and Design*, 100, 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2015.07.001>
- Noe, M., & Steurer, M. (2007). High-temperature superconductors for future power grids. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 17(2), 2338–2343. <https://doi.org/10.1109/TASC.2007.897646>
- Yamaguchi, S. (2019). Superconducting technologies for advanced power systems. *Journal of Energy Storage*, 24, 100761. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100761>