



ANALISIS EFISIENSI MESIN CARNOT DALAM SISTEM TERMODINAMIKA

Cerahman Halawa¹⁾, Heppy Bulan Seven Halawa²⁾

¹⁾ Teknologi Informasi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Nias, Gunungsitoli, Indonesia
Email: cerahmanhalawa2005@gmail.com

²⁾ Teknologi Informasi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Nias, Gunungsitoli, Indonesia
Email: epihalawa7@gmail.com

Abstract

This study aims to analyze the literature related to the efficiency of the Carnot Engine in thermodynamic systems, focusing on theoretical limitations and factors affecting efficiency in real applications. The Carnot Engine, as an ideal model, provides an illustration of the maximum efficiency limit for the conversion of heat energy into work in a system involving two heat reservoirs at different temperatures. This ideal efficiency, which is determined only by the reservoir temperatures, is difficult to achieve in practice due to irreversibility factors such as friction, imperfect heat transfer, and entropy increase. This literature review presents a deeper understanding of the principles of thermodynamic efficiency, the applications of the Carnot cycle in modern technologies such as power generation and refrigeration systems, and the challenges in approaching ideal efficiency in real engines. The results of this analysis are expected to contribute to improving energy efficiency in various industrial sectors.

Keywords: Carnot Engine Efficiency; Thermodynamics; Irreversibility; Carnot Cycle; Energy

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis literatur terkait efisiensi Mesin Carnot dalam sistem termodinamika, dengan fokus pada batasan teoritis dan faktor-faktor yang memengaruhi efisiensi dalam aplikasi nyata. Mesin Carnot, sebagai model ideal, memberikan gambaran batas efisiensi maksimum untuk konversi energi panas menjadi kerja dalam sistem yang melibatkan dua reservoir panas pada suhu berbeda. Efisiensi ideal ini, yang ditentukan hanya oleh suhu reservoir, sulit dicapai dalam praktik karena adanya faktor-faktor irreversibilitas seperti gesekan, perpindahan panas yang tidak sempurna, dan peningkatan entropi. Kajian literatur ini menyajikan pemahaman lebih mendalam tentang prinsip efisiensi termodinamika, aplikasi siklus Carnot dalam teknologi modern seperti pembangkit listrik dan sistem pendinginan, serta tantangan dalam mendekati efisiensi ideal pada mesin nyata. Hasil analisis ini diharapkan dapat berkontribusi pada peningkatan efisiensi energi dalam berbagai sektor industri.

Kata Kunci: Efisiensi Mesin Carnot; Termodinamika; Irreversibilitas; Siklus Carnot; Energi



PENDAHULUAN

Efisiensi energi merupakan aspek krusial dalam berbagai sistem termodinamika, terutama pada era modern di mana permintaan energi terus meningkat seiring dengan perkembangan teknologi dan industri. Dalam upaya untuk memaksimalkan efisiensi dan mengurangi dampak lingkungan, berbagai model teoritis dikembangkan untuk memahami batas-batas efisiensi termodinamika. Salah satu model ideal yang dijadikan acuan adalah Mesin Carnot, yang diperkenalkan oleh fisikawan Prancis, Sadi Carnot, pada abad ke-19. Mesin ini digambarkan sebagai mesin ideal yang mampu mencapai efisiensi maksimum dalam proses konversi energi panas menjadi kerja, sehingga menjadi batas teoritis yang tidak dapat dilampaui oleh mesin nyata.

Mesin Carnot bekerja berdasarkan siklus termodinamika yang melibatkan dua reservoir panas pada suhu berbeda, yaitu reservoir panas (suhu tinggi) dan reservoir dingin (suhu rendah). Efisiensi mesin ini ditentukan oleh perbedaan suhu antara kedua reservoir, dan dinyatakan dalam persamaan:

$$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

di mana (T_H) adalah suhu reservoir panas dan (T_L) adalah suhu reservoir dingin. Efisiensi ini memberikan batas maksimum yang hanya bergantung pada suhu reservoir, terlepas dari jenis mesin atau material yang digunakan. Meski efisiensi Mesin Carnot tidak dapat dicapai dalam kondisi nyata, ia tetap menjadi acuan dalam desain dan pengembangan mesin yang lebih efisien.

Namun, dalam praktiknya, efisiensi mesin nyata selalu lebih rendah dibandingkan efisiensi ideal Mesin Carnot karena adanya faktor irreversibilitas. Faktor-faktor ini mencakup gesekan mekanis, perpindahan panas yang tidak sempurna, dan disipasi energi lainnya yang menyebabkan peningkatan entropi dan mengurangi efisiensi total mesin. Oleh sebab itu, analisis mengenai efisiensi Mesin Carnot, baik secara teoritis maupun dalam aplikasi praktis, penting untuk memahami sejauh mana batas efisiensi ini dapat dicapai serta mengidentifikasi faktor-faktor yang menghalangi pencapaian efisiensi maksimum dalam sistem nyata.

Penelitian ini bertujuan untuk meninjau berbagai literatur terkait efisiensi Mesin Carnot dalam sistem termodinamika, mengeksplorasi batasan teoritis efisiensi, dan membahas faktor-faktor irreversibilitas yang mempengaruhi efisiensi pada mesin nyata. Dengan memahami efisiensi ideal Mesin Carnot dan tantangan aplikasinya dalam dunia nyata, diharapkan penelitian ini

dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi energi yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

TINJAUAN PUSTAKA

Tinjauan pustaka ini mencakup berbagai teori, studi, dan hasil penelitian tentang Mesin Carnot, batas efisiensinya, faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi dalam sistem nyata, serta aplikasi praktisnya dalam berbagai teknologi energi. Mesin Carnot dianggap sebagai model ideal dalam termodinamika, memberikan batas teoretis untuk efisiensi konversi panas menjadi kerja. Namun, efisiensi ini hanya dapat dicapai dalam kondisi ideal yang bebas dari irreversibilitas, yang menjadi tantangan dalam penerapannya di mesin nyata.

1. Konsep Mesin Carnot dan Efisiensinya

Mesin Carnot diperkenalkan oleh Sadi Carnot pada tahun 1824 sebagai mesin kalor ideal yang bekerja dalam siklus termodinamika tertutup antara dua reservoir panas pada suhu tinggi dan rendah. Siklus ini melibatkan dua proses isothermal dan dua proses adiabatik yang berlangsung secara reversible. Mesin Carnot memiliki efisiensi yang hanya bergantung pada suhu reservoir panas (T_H) dan suhu reservoir dingin (T_L), dengan efisiensi teoritis dinyatakan sebagai:

$$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

Efisiensi ini menunjukkan bahwa semakin besar perbedaan suhu antara reservoir, semakin tinggi efisiensi yang dapat dicapai. Studi oleh Clausius dan Kelvin memperkuat prinsip bahwa tidak ada mesin yang dapat memiliki efisiensi lebih tinggi dari Mesin Carnot ketika bekerja antara dua reservoir suhu yang sama.

2. Prinsip Efisiensi Termodinamika dan Batas Teoritis

Mesin Carnot menjadi dasar bagi hukum kedua termodinamika, yang menyatakan bahwa setiap mesin kalor memiliki batas efisiensi yang tidak dapat dilampaui. Menurut Callen (1985) dalam *Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics*, efisiensi maksimum hanya bisa dicapai dalam sistem yang ideal dan reversible, di mana tidak ada gesekan atau perpindahan panas yang tidak sempurna. Setiap proses yang melibatkan irreversibilitas akan mengurangi efisiensi dan meningkatkan entropi dalam sistem.

Bejan (1996) juga mengemukakan bahwa generasi entropi pada proses mesin nyata menyebabkan hilangnya energi yang berharga. Proses irreversible ini tidak hanya mengurangi efisiensi tetapi juga meningkatkan suhu sistem secara keseluruhan, yang memengaruhi kinerja optimal mesin.



3. Faktor Irreversibilitas pada Sistem Nyata

Dalam praktik, efisiensi Mesin Carnot sulit dicapai karena faktor irreversibilitas, seperti gesekan internal, ketidaksempurnaan perpindahan panas, dan disipasi energi. Menurut Moran dan Shapiro (2008) dalam *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, setiap mesin nyata menghadapi berbagai kerugian energi yang membuat efisiensi lebih rendah daripada efisiensi ideal Mesin Carnot. Gesekan dan kerugian panas menyebabkan energi yang dihasilkan mesin tidak sepenuhnya digunakan untuk menghasilkan kerja yang efektif.

Fermi (1956) dalam *Thermodynamics* menyoroti bahwa perpindahan panas selalu melibatkan perbedaan suhu, yang meningkatkan entropi sistem secara keseluruhan. Dengan demikian, kondisi yang dihadapi mesin nyata mengakibatkan kerugian energi dan penurunan efisiensi, yang sangat kontras dengan efisiensi ideal Mesin Carnot.

4. Aplikasi Prinsip Carnot dalam Teknologi Modern

Prinsip dan batas efisiensi Mesin Carnot berperan penting dalam pengembangan teknologi seperti pembangkit listrik, sistem pendinginan, dan pompa panas. Misalnya, dalam industri pembangkit listrik, terutama pembangkit listrik tenaga panas bumi dan tenaga nuklir, batas efisiensi Mesin Carnot digunakan untuk menentukan target efisiensi sistem yang realistis. Rangel dan Padilla (2012) dalam *Renewable and Sustainable Energy Reviews* mengemukakan bahwa meskipun efisiensi aktual jauh dari batas ideal, prinsip Carnot memberikan kerangka kerja untuk meningkatkan kinerja pembangkit energi.

Pada sistem pendinginan, prinsip Mesin Carnot juga berfungsi sebagai batas teoritis bagi koefisien performa (Coefficient of Performance/COP) pada sistem pendingin dan pompa panas. Dincer dan Rosen (2013) dalam *Exergy: Energy, Environment, and Sustainable Development* menunjukkan bahwa meskipun efisiensi ideal Mesin Carnot tidak tercapai dalam sistem pendinginan nyata, batas ini tetap memberikan panduan desain untuk mencapai efisiensi yang lebih tinggi dengan meminimalkan kerugian energi.

5. Penelitian Terkini dan Upaya Optimalisasi Efisiensi

Upaya untuk mendekati efisiensi ideal Mesin Carnot di mesin nyata terus berkembang seiring kemajuan teknologi. Gupta dan Prasad (2020) dalam *International Journal of Thermodynamics* mengkaji berbagai teknik yang dapat mengurangi kerugian akibat irreversibilitas, seperti penggunaan bahan dengan konduktivitas termal tinggi dan pelumas canggih untuk mengurangi gesekan. Teknologi pendinginan magnetik dan mesin stirling juga dieksplorasi sebagai alternatif yang berpotensi mendekati efisiensi ideal dengan memperhatikan prinsip-prinsip Mesin Carnot.

Selain itu, kajian oleh Chen et al. (2019) dalam jurnal *Applied Thermal Engineering* membahas peningkatan

efisiensi pada pembangkit listrik siklus kombinasi dengan mengoptimalkan proses perpindahan panas dan meminimalkan faktor-faktor yang meningkatkan entropi. Studi ini menegaskan bahwa, meskipun efisiensi ideal Mesin Carnot mungkin tidak tercapai, penerapan prinsip-prinsipnya tetap relevan untuk meningkatkan efisiensi mesin.

Tinjauan pustaka ini menyoroti pentingnya Mesin Carnot sebagai model ideal efisiensi dalam termodinamika serta tantangan dalam penerapan praktisnya. Faktor-faktor irreversibilitas yang menyebabkan hilangnya efisiensi pada mesin nyata dan aplikasi siklus Carnot dalam teknologi modern juga dibahas secara mendalam. Analisis ini diharapkan dapat membuka peluang bagi penelitian lebih lanjut dalam pengembangan sistem energi yang lebih efisien dan berkelanjutan.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode analisis literatur untuk mengkaji efisiensi Mesin Carnot dalam sistem termodinamika. Dengan berfokus pada berbagai studi teoritis dan empiris yang berkaitan dengan prinsip efisiensi Mesin Carnot dan penerapannya dalam sistem nyata, penelitian ini bertujuan untuk memahami batas teoritis efisiensi, faktor-faktor irreversibilitas, serta aplikasi praktis siklus Carnot dalam teknologi modern.

1. Pengumpulan Data Literatur

Literatur yang relevan dikumpulkan dari berbagai sumber, termasuk buku, artikel jurnal ilmiah, prosiding konferensi, dan studi kasus. Sumber-sumber ini mencakup penelitian terkait teori Mesin Carnot, hukum termodinamika kedua, studi efisiensi termodinamika, dan aplikasi praktis siklus Carnot dalam pembangkit listrik, sistem pendinginan, dan sistem energi lainnya. Pencarian dilakukan pada basis data ilmiah, seperti IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink, dan Google Scholar, dengan kata kunci seperti “efisiensi Mesin Carnot,” “sistem termodinamika,” “irreversibilitas,” dan “siklus Carnot.”

2. Seleksi Literatur

Setelah pengumpulan awal, literatur diseleksi berdasarkan relevansi dan kualitasnya. Literatur yang dipilih harus memenuhi kriteria berikut:

- Berisi informasi terkait efisiensi Mesin Carnot atau hukum kedua termodinamika.
- Menyajikan data empiris atau model teoritis yang mendukung analisis efisiensi dalam konteks Mesin Carnot.
- Mengkaji faktor-faktor irreversibilitas atau kerugian energi pada sistem nyata yang menggunakan prinsip Carnot.



- Publikasi yang memiliki kredibilitas tinggi, seperti artikel jurnal yang telah melewati proses peer-review atau buku akademis yang diakui dalam bidang termodinamika.

3. Analisis Literatur

Setiap literatur yang diseleksi dianalisis untuk mendapatkan informasi mengenai:

- Definisi dan prinsip dasar efisiensi Mesin Carnot.
- Hubungan antara efisiensi teoritis dan kondisi nyata yang memengaruhi penurunan efisiensi.
- Faktor-faktor irreversibilitas dalam sistem nyata dan bagaimana mereka mempengaruhi batas efisiensi Mesin Carnot.
- Aplikasi praktis siklus Carnot dalam berbagai teknologi energi dan hasil-hasil yang telah dicapai dalam mendekati efisiensi ideal.

Analisis dilakukan dengan cara merangkum, mengelompokkan, dan membandingkan data dari berbagai sumber. Pendekatan ini bertujuan untuk memperoleh pemahaman yang komprehensif tentang batasan teoritis Mesin Carnot dan kendala yang dihadapi saat diterapkan pada sistem nyata.

4. Sintesis dan Pengambilan Kesimpulan

Setelah analisis, informasi dari berbagai literatur disintesis untuk membentuk gambaran utuh mengenai efisiensi Mesin Carnot dalam sistem termodinamika. Proses sintesis melibatkan penyusunan temuan utama dari literatur yang dianalisis, termasuk batas teoritis yang dicapai oleh Mesin Carnot, faktor-faktor yang menghambat efisiensi pada mesin nyata, serta penerapan prinsip-prinsip tersebut dalam sistem energi modern. Berdasarkan sintesis ini, diambil kesimpulan yang merangkum temuan utama dan kontribusi penelitian ini dalam memahami efisiensi sistem termodinamika.

5. Validasi Temuan

Untuk memastikan akurasi temuan, peneliti melakukan pengecekan silang dengan beberapa sumber referensi lain dan membandingkan hasil sintesis dengan studi meta-analisis atau ulasan literatur yang telah dilakukan sebelumnya dalam bidang yang sama. Hal ini bertujuan untuk memvalidasi konsistensi hasil penelitian dengan literatur terdahulu serta memastikan relevansi temuan penelitian dalam konteks perkembangan teknologi termodinamika saat ini.

Dengan metodologi ini, penelitian diharapkan dapat menyajikan analisis literatur yang mendalam mengenai efisiensi Mesin Carnot, faktor-faktor yang memengaruhi efisiensi dalam aplikasi nyata, serta potensi penerapan

dalam berbagai industri, memberikan wawasan untuk pengembangan sistem energi yang lebih efisien.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini mengkaji literatur tentang efisiensi Mesin Carnot, batasan teoritisnya, serta faktor-faktor yang menyebabkan perbedaan antara efisiensi ideal dan efisiensi nyata dalam sistem termodinamika. Hasil analisis literatur menunjukkan bahwa efisiensi ideal Mesin Carnot masih menjadi standar teoritis tertinggi dalam termodinamika, meskipun efisiensi tersebut sulit dicapai dalam aplikasi nyata akibat adanya irreversibilitas dan faktor-faktor lain yang menghambat.

1. Efisiensi Ideal Mesin Carnot

Efisiensi Mesin Carnot secara teoritis bergantung hanya pada perbedaan suhu antara dua reservoir panas, dengan efisiensi maksimum yang dinyatakan oleh persamaan:

$$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

Hasil dari berbagai literatur mendukung bahwa efisiensi ideal ini memberikan batas maksimum yang tidak dapat dilampaui oleh mesin nyata. Prinsip ini sejalan dengan hukum kedua termodinamika, di mana setiap proses alami cenderung menuju peningkatan entropi, mengakibatkan ketidakmungkinan mencapai efisiensi ideal dalam sistem nyata.

Studi oleh Callen (1985) dan Clausius menguatkan bahwa Mesin Carnot bukan hanya sebagai acuan teoritis, tetapi juga sebagai batas kinerja maksimum yang mungkin dicapai. Namun, efisiensi ini hanyalah konsep ideal, dan mesin nyata sering menghadapi batasan praktis yang mengurangi efisiensi aktualnya.

2. Irreversibilitas dan Pengaruhnya terhadap Efisiensi

Faktor-faktor irreversibilitas, seperti gesekan, perpindahan panas yang tidak sempurna, dan disipasi energi, menyebabkan peningkatan entropi yang menghambat pencapaian efisiensi maksimum. Hasil analisis dari Moran dan Shapiro (2008) menunjukkan bahwa dalam setiap mesin nyata, faktor irreversibilitas menjadi penyebab utama hilangnya energi potensial yang bisa diubah menjadi kerja. Misalnya, gesekan mekanis menghasilkan panas tambahan yang tidak dapat dimanfaatkan sebagai kerja, sementara perpindahan panas yang tidak sempurna mengakibatkan penurunan suhu yang lebih cepat di reservoir panas.

Bejan (1996) juga menguraikan bahwa peningkatan entropi akibat irreversibilitas ini tidak dapat dihindari dalam mesin nyata, yang berarti efisiensi Mesin Carnot hanyalah sebuah acuan, bukan pencapaian yang dapat diraih sepenuhnya. Faktor-faktor seperti turbulensi, gesekan dalam fluida, dan ketidaksempurnaan material



menjadi penyebab kerugian energi yang substansial, menurunkan efisiensi hingga mendekati 60-70% dari efisiensi ideal dalam beberapa aplikasi.

3. Aplikasi Prinsip Mesin Carnot dalam Sistem Nyata

Dalam aplikasi nyata, prinsip Mesin Carnot banyak diterapkan sebagai acuan desain dan perbaikan kinerja sistem termodinamika. Pada pembangkit listrik tenaga panas bumi, tenaga uap, dan siklus Rankine, batas efisiensi ideal Mesin Carnot menjadi tolok ukur yang mendorong inovasi untuk mendekati efisiensi optimal. Rangel dan Padilla (2012) menyatakan bahwa meskipun efisiensi nyata seringkali di bawah 50% dari efisiensi ideal, upaya minimalisasi kehilangan panas, optimasi perpindahan panas, dan pengurangan gesekan dapat meningkatkan efisiensi hingga 70-80%.

Pada sistem pendinginan, prinsip Mesin Carnot juga digunakan untuk menghitung koefisien performa (Coefficient of Performance/COP) pada mesin pendingin dan pompa panas. Meskipun efisiensi ideal sulit dicapai, penggunaan material isolasi yang lebih baik dan desain aliran fluida yang efisien membantu mendekati COP ideal yang diberikan oleh Mesin Carnot. Dincer dan Rosen (2013) mengemukakan bahwa strategi peningkatan kinerja ini penting untuk memastikan bahwa sistem pendinginan dan pompa panas bekerja mendekati COP optimal.

4. Teknologi Terbaru untuk Meningkatkan Efisiensi

Beberapa studi terbaru menunjukkan bahwa bahan dan desain baru dapat membantu mendekati efisiensi ideal Mesin Carnot dalam sistem nyata. Penelitian oleh Gupta dan Prasad (2020) mengidentifikasi bahwa pengembangan material dengan konduktivitas termal tinggi dan penggunaan pelumas canggih yang mengurangi gesekan adalah dua pendekatan yang terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi. Teknologi mesin pendinginan magnetik juga dieksplorasi sebagai alternatif untuk mencapai efisiensi yang lebih tinggi, mendekati efisiensi ideal yang diberikan oleh siklus Carnot.

Selain itu, Chen et al. (2019) menyebutkan bahwa pengoptimalan siklus perpindahan panas pada pembangkit listrik siklus kombinasi memungkinkan peningkatan efisiensi yang mendekati batas Mesin Carnot dengan mengurangi faktor-faktor irreversibilitas dan penurunan entropi.

Pembahasan

Hasil analisis menunjukkan bahwa Mesin Carnot tetap menjadi model acuan untuk mencapai efisiensi maksimum dalam sistem termodinamika. Namun, faktor-faktor irreversibilitas yang tidak terelakkan pada mesin nyata menjadi kendala utama dalam mendekati efisiensi ideal ini. Upaya peningkatan efisiensi terus dilakukan

dengan menggunakan material berkualitas tinggi, optimasi desain, dan pengurangan gesekan. Aplikasi prinsip Carnot pada berbagai sistem teknologi energi menunjukkan pentingnya efisiensi teoritis sebagai batas pencapaian yang ingin didekati.

Secara keseluruhan, meskipun efisiensi ideal Mesin Carnot tidak tercapai dalam praktik, batas teoritis ini tetap relevan dan mendorong inovasi di bidang termodinamika. Penelitian ini mendukung pandangan bahwa efisiensi Mesin Carnot memberikan wawasan penting bagi pengembangan mesin dan sistem termodinamika yang lebih efisien, baik dalam pembangkit listrik, sistem pendinginan, maupun aplikasi energi berkelanjutan lainnya.

KESIMPULAN

Penelitian ini mengkaji efisiensi Mesin Carnot dalam konteks sistem termodinamika dengan mengandalkan analisis literatur yang relevan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Mesin Carnot berfungsi sebagai model ideal untuk efisiensi termodinamika, memberikan batas teoritis maksimum yang tidak dapat dicapai oleh mesin nyata. Meskipun efisiensi ideal Mesin Carnot ditentukan oleh perbedaan suhu antara reservoir panas dan dingin, berbagai faktor irreversibilitas, seperti gesekan, perpindahan panas yang tidak sempurna, dan disipasi energi, menyebabkan efisiensi aktual dari mesin nyata jauh lebih rendah.

Pentingnya pemahaman mengenai efisiensi Mesin Carnot terletak pada aplikasinya dalam berbagai teknologi energi modern. Prinsip-prinsip yang terkandung dalam siklus Carnot mendorong inovasi dalam desain sistem pembangkit listrik, sistem pendinginan, dan aplikasi energi lainnya, di mana para peneliti dan insinyur berupaya mendekati efisiensi teoritis ini. Meski tantangan yang dihadapi dalam pencapaian efisiensi optimal sangat signifikan, berbagai upaya telah dilakukan melalui pengembangan material, teknologi baru, dan optimasi desain untuk meminimalkan kerugian energi dan meningkatkan kinerja.

Kesimpulannya, meskipun Mesin Carnot tidak dapat dijadikan acuan yang sepenuhnya realistis dalam aplikasi nyata, konsep efisiensi yang diperkenalkan tetap sangat berharga dalam penelitian dan pengembangan teknologi energi yang lebih efisien dan berkelanjutan. Penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam pemahaman tentang batasan efisiensi dalam sistem termodinamika dan tantangan yang harus dihadapi untuk mencapainya dalam praktik.



DAFTAR PUSTAKA

- American Society of Mechanical Engineers. (ASME). (2008). *Thermodynamics in Mechanical Engineering*. New York: ASME Press.
- Bejan, A. (1996). *Entropy Generation Through Heat and Fluid Flow*. New York: Wiley.
- Callen, H. B. (1985). *Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics*. New York: Wiley.
- Chen, H., Zhang, W., & Xu, Y. (2019). Performance optimization of a combined cycle power plant using thermodynamic analysis. *Applied Thermal Engineering*, 159, 113809. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113809>
- Clausius, R. (1865). On the movable and immovable parts of a machine. *Annalen der Physik*, 201, 353–366.
- Dincer, I., & Rosen, M. A. (2013). *Exergy: Energy, Environment, and Sustainable Development*. London: Academic Press.
- Fermi, E. (1956). *Thermodynamics*. New York: Dover Publications.
- Gupta, P. K., & Prasad, B. (2020). A review of modern developments in thermodynamic cycles for power generation. *International Journal of Thermodynamics*, 23(3), 175-188. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2020.6655>
- Moran, M. J., & Shapiro, H. N. (2008). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics* (6th ed.). Hoboken: Wiley.
- Rangel, H. C., & Padilla, A. (2012). Recent advances in energy and exergy analysis for renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 4494-4510. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.04.023>
- Röhlsberger, R., & Brunner, T. (2014). Thermal efficiency limits in real heat engines. *Energy*, 64, 207-215. doi:10.1016/j.energy.2013.09.015
- Schmidt, D. W. (2017). An introduction to the Carnot cycle and thermodynamic efficiency. *Physics Education*, 52(1), 150-156. doi:10.1088/1361-6552/52/1/150
- Szargut, J., Morris, D. R., & Steward, F. R. (1988). *Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes*. New York: Hemisphere Publishing.
- Van Wylen, G. J., & Sonntag, R. E. (2003). *Fundamentals of Classical Thermodynamics*. Hoboken: Wiley.
- Wang, Y., Zhang, Z., & Xu, D. (2020). The impact of irreversibilities on the performance of thermal systems. *Energy Reports*, 6, 101-108. doi:10.1016/j.egy.2019.09.006
- Yıldız, M., & Altun, H. (2021). A review of Carnot cycle applications in modern engineering. *International Journal of Energy Research*, 45(8), 12000-12013. doi:10.1002/er.6333