

Analisis Energi, Ekonomi, dan Lingkungan pada Penerapan Sistem Combined Heat and Power (CHP) dan Absorption Chiller di Sektor Perhotelan

Munir Fasihu

Institut Teknologi PLN

*Corresponding Author e-mail: munir@itpln.ac.id

Received: September 2025; October: July 2025; Published: December 2025

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi penghematan energi primer, keuntungan ekonomi, dan dampak lingkungan dari penerapan sistem Combined Heat and Power (CHP) yang dikombinasikan dengan penyejuk absorpsi untuk pasokan energi di sebuah hotel di Düsseldorf, Jerman. Dalam studi ini, dilakukan analisis beban energi yang mencakup kebutuhan listrik dan panas, simulasi operasi sistem dengan berbagai skenario modul CHP berbahan bakar minyak pemanas, serta perhitungan ekonomi dan emisi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan sistem CHP dapat menghemat energi primer hingga 37% dan mengurangi emisi CO₂ hingga 56,6% dibandingkan dengan sistem konvensional yang memisahkan produksi listrik dan panas. Konfigurasi tiga modul CHP menghasilkan penghematan tahunan tertinggi sebesar €54.676,27, dengan periode pengembalian investasi yang menarik, yang mengindikasikan bahwa sistem ini memiliki potensi keuntungan finansial yang signifikan. Dengan demikian, penelitian ini menegaskan bahwa sistem CHP sangat layak diterapkan dalam industri perhotelan, karena tidak hanya meningkatkan efisiensi energi secara signifikan tetapi juga memberikan manfaat finansial dan kontribusi positif terhadap perlindungan lingkungan, menjadikannya solusi yang berkelanjutan dalam sektor perhotelan.

Kata kunci: Combined Heat and Power (CHP), Absorption Chiller, Efisiensi Energi, Analisis Ekonomi, Emisi CO₂, Hotel

Energy, Economic, and Environmental Analysis on the Implementation of Combined Heat and Power (CHP) and Absorption Chiller Systems in the Hospitality Sector

Abstract

This study aims to evaluate the potential primary energy savings, economic benefits, and environmental impacts of implementing a Combined Heat and Power (CHP) system combined with absorption cooling for energy supply in a hotel in Düsseldorf, Germany. In this study, an energy load analysis covering electricity and heat demand, simulation of system operation with various scenarios of CHP modules fired by heating oil, and economic and emission calculations were performed. The results show that the implementation of the CHP system can save primary energy up to 37% and reduce CO₂ emissions up to 56.6% compared to a conventional system that separates electricity and heat production. The configuration of three CHP modules resulted in the highest annual savings of €54,676.27, with an attractive payback period, indicating that this system has significant financial potential. Thus, this study confirms that the CHP system is highly feasible to be implemented in the hospitality industry, as it not only significantly improves energy efficiency but also provides financial benefits and positive contributions to environmental protection, making it a sustainable solution in the hospitality sector.

Keywords: Combined Heat and Power, Absorption Chiller, Energy efficiency, Economic analysis, CO₂ emissions, Hotel.

How to Cite: Fasihu, M. (2025). Analisis Energi, Ekonomi, dan Lingkungan pada Penerapan Sistem Combined Heat and Power (CHP) dan Absorption Chiller di Sektor Perhotelan. *Journal of Authentic Research*, 4(2), 1712-1721. <https://doi.org/10.36312/mjnqp234>



<https://doi.org/10.36312/mjnqp234>

Copyright© 2025, F Fasihu.

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



PENDAHULUAN

Jerman sebagai negara industri maju memiliki visi yang jelas dalam mencapai transisi energi berkelanjutan yang mengutamakan pasokan energi yang aman, cukup, terjangkau, dan ramah lingkungan. Negara ini tidak hanya memiliki kapasitas industri yang besar, tetapi juga berperan penting dalam perkembangan inovasi teknologi energi, terutama dalam menghadapi tantangan perubahan iklim yang semakin mendesak. (Abbass et al., 2022; Hulyadi et al., 2023; Muhali et al., 2025) Global warming, akibat peningkatan emisi gas rumah kaca, menjadi masalah utama yang mendorong negara-negara di seluruh dunia untuk mencari solusi inovatif guna mengurangi jejak karbon mereka. Dalam konteks ini, sektor energi Jerman menghadapi tantangan untuk menciptakan sistem yang efisien, berkelanjutan, dan ramah lingkungan yang mampu memenuhi permintaan energi yang terus berkembang seiring dengan pertumbuhan ekonomi.

Pada dasarnya, efisiensi energi di Jerman bukan hanya menjadi kebijakan nasional, tetapi juga merupakan kebutuhan mendesak untuk menjaga kestabilan ekonomi dan lingkungan. Seiring dengan meningkatnya kesadaran global terhadap dampak negatif perubahan iklim, terdapat tuntutan untuk mengurangi ketergantungan terhadap sumber energi fosil yang berkontribusi besar terhadap emisi CO₂ dan gas rumah kaca lainnya. Salah satu pendekatan utama untuk mencapainya adalah dengan memperkenalkan teknologi yang lebih efisien dalam proses produksi energi, di antaranya adalah sistem *Combined Heat and Power* (CHP) atau yang dalam bahasa Jerman dikenal dengan istilah *Kraft-Wärme-Kopplung* (KWK) (Bagherian & Mehranzamir, 2020; Maghanki et al., 2013).

Sistem CHP merupakan sebuah teknologi yang memungkinkan produksi energi listrik dan panas secara simultan dalam satu proses yang terintegrasi, yang bertujuan untuk meningkatkan efisiensi energi primer dibandingkan dengan sistem konvensional yang memisahkan produksi listrik dan panas. Sebagai salah satu solusi efisiensi energi, sistem CHP memiliki potensi besar untuk mencapai efisiensi lebih dari 80%, jauh lebih tinggi dibandingkan dengan sistem konvensional yang hanya menghasilkan efisiensi sekitar 30-40% (Bach et al., 2019). Salah satu keuntungan utama dari teknologi ini adalah kemampuannya dalam mengurangi pemborosan energi, karena panas yang dihasilkan dalam proses pembangkit listrik digunakan kembali untuk keperluan pemanasan.

(Bagherian & Mehranzamir, 2020) melaporkan meskipun teknologi CHP telah banyak diterapkan di berbagai sektor industri besar, penerapan sistem CHP di sektor perhotelan masih terbatas. Sektor perhotelan, terutama di daerah dengan iklim sedang seperti Düsseldorf, memiliki karakteristik yang sangat berbeda dengan sektor industri lainnya. Hotel-hotel, seperti yang dijelaskan dalam penelitian sebelumnya, memiliki profil beban energi yang fluktuatif dan sangat bergantung pada kebutuhan simultan untuk pemanas, pendinginan, dan air panas. Hal ini menjadikan tantangan besar bagi penerapan teknologi CHP secara konvensional di sektor ini. Apakah sistem CHP dapat bekerja optimal di sektor perhotelan, dan bagaimana dampaknya terhadap pengurangan emisi gas rumah kaca serta efisiensi energi secara keseluruhan, adalah pertanyaan yang masih perlu dieksplorasi lebih lanjut (Olabi et al., 2020).

(Herrando & Ramos, 2022; Maghanki et al., 2013) menyatkan penerapan sistem *Combined Heat, Power, and Cooling* (CHPC) atau *Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung* (KWKK)

semakin menjadi fokus penelitian, terutama di sektor perhotelan dan industri lainnya yang memiliki kebutuhan energi beragam. CHPC tidak hanya menghasilkan panas dan listrik, tetapi juga menyediakan pendinginan, menjadikannya sistem yang lebih fleksibel dan efisien untuk sektor-sektor yang memerlukan ketiga elemen energi tersebut dalam waktu bersamaan. Seiring dengan meningkatnya permintaan akan pendinginan di bangunan komersial, seperti hotel, terutama di musim panas, sistem CHPC menawarkan potensi besar untuk memenuhi kebutuhan energi dengan cara yang lebih terintegrasi dan berkelanjutan (Olabi et al., 2020).

Sejumlah studi terbaru telah menunjukkan bahwa penerapan sistem CHPC dapat menghasilkan keuntungan besar dalam hal efisiensi energi dan pengurangan emisi. Misalnya, Schmidt dan Meyer (2021) dalam penelitian mereka mengungkapkan bahwa dengan menggabungkan pemanasan, pendinginan, dan pembangkit listrik dalam satu sistem terintegrasi, efisiensi energi yang dicapai dapat lebih dari 85%, sebuah angka yang jauh lebih tinggi daripada metode konvensional. Teknologi ini memungkinkan energi yang dihasilkan tidak hanya dimanfaatkan untuk kebutuhan pemanas dan pembangkit listrik, tetapi juga dapat menyediakan pendinginan yang dibutuhkan oleh hotel dan bangunan komersial lainnya, yang pada gilirannya mengurangi ketergantungan pada sistem pendinginan listrik konvensional yang cenderung lebih boros energi (Herrando & Ramos, 2022; Maghanki et al., 2013; Previtali, 2020).

Meskipun teknologi CHP dan CHPC telah banyak diteliti dan diterapkan di sektor industri dan kawasan perumahan, penerapan sistem ini di sektor perhotelan, terutama di wilayah beriklim sedang seperti Düsseldorf, masih sangat terbatas. Hotel-hotel di daerah ini memiliki tantangan yang unik dalam hal beban energi, yang tidak hanya bervariasi sepanjang tahun, tetapi juga memiliki kebutuhan simultan terhadap pemanas, pendingin, dan air panas. Hal ini menciptakan tantangan tersendiri dalam hal efisiensi operasional dan pengelolaan sumber daya energi. Sementara sebagian besar penelitian sebelumnya berfokus pada penerapan sistem CHP di bangunan industri besar atau kawasan perumahan, sistem yang dapat memenuhi kebutuhan energi dalam sektor perhotelan belum banyak dieksplorasi. Penelitian terkait penerapan sistem CHP yang dikombinasikan dengan penyejuk absorpsi pada hotel di Düsseldorf, dengan kapasitas 246 kamar dan 500 tempat tidur, masih jarang. Padahal, potensi penghematan energi dan pengurangan emisi dalam sektor perhotelan sangat besar. Oleh karena itu, sangat penting untuk melakukan penelitian lebih lanjut mengenai penerapan sistem CHPC di sektor ini, guna mengevaluasi kelayakan teknis, ekonomi, dan lingkungan dari teknologi ini.

Sistem CHPC yang mengintegrasikan pembangkit listrik, pemanas, dan pendinginan dalam satu proses dapat menjadi solusi yang sangat inovatif untuk mengatasi tantangan besar dalam sektor perhotelan. Tidak hanya dapat meningkatkan efisiensi energi secara signifikan, tetapi juga berpotensi mengurangi biaya operasional jangka panjang dan menurunkan emisi karbon. Penyejuk absorpsi, yang digunakan untuk menghasilkan pendinginan dari panas buang yang dihasilkan oleh sistem CHP, memberikan kontribusi besar dalam mengoptimalkan penggunaan energi yang ada. Urgensi penelitian ini sangat tinggi, mengingat kebutuhan untuk meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi jejak karbon di sektor perhotelan, yang merupakan sektor yang cukup besar dalam konsumsi energi di Jerman. Mengingat bahwa sektor perhotelan terus berkembang, terutama dengan

meningkatnya pariwisata, penerapan teknologi yang efisien seperti CHPC dapat memberikan dampak yang signifikan terhadap pencapaian tujuan Jerman dalam transisi energi berkelanjutan. Selain itu, penelitian ini akan memberikan kontribusi ilmiah yang berarti dalam pengembangan strategi efisiensi energi dan dekarbonisasi di sektor perhotelan, sekaligus memberikan solusi konkret bagi industri yang dapat diadaptasi di berbagai daerah dengan karakteristik yang serupa.

METODE

Penelitian dilakukan melalui beberapa tahap utama. Tahap pertama adalah analisis beban energi, yaitu mengumpulkan dan menganalisis data kebutuhan listrik serta panas harian dan bulanan hotel. Tahap kedua adalah pemodelan sistem, di mana sistem energi dirancang dengan mengintegrasikan beberapa komponen utama. Unit CHP menggunakan mesin berbahan bakar minyak pemanas (Heating Oil EL) dengan tiga skenario yang dievaluasi, yakni satu, dua, dan tiga modul CHP. Setiap modul memiliki daya listrik sebesar 180 kW, daya termal 215 kW, efisiensi listrik 36%, dan efisiensi termal 43%. Absorption chiller dimanfaatkan untuk menggunakan panas buangan dari sistem CHP dalam menghasilkan pendingin pada bulan-bulan musim panas. Peak load boiler berfungsi untuk memenuhi kebutuhan panas puncak yang tidak dapat dipenuhi oleh CHP, sementara heat storage tank digunakan untuk menyimpan kelebihan panas agar sistem dapat beroperasi secara lebih efisien.

Tahap berikutnya adalah simulasi operasi, yang dilakukan untuk memperkirakan performa sistem secara bulanan menggunakan pendekatan Gradtagzahl (GTZ) atau Degree Day Numbers. Simulasi ini dilaksanakan dengan bantuan perangkat lunak TRNSYS 18, yang dipilih karena kemampuannya dalam memodelkan sistem energi termal secara dinamis dan akurat untuk berbagai skenario beban. Melalui simulasi tersebut, ditentukan besaran pembangkitan listrik dan panas, kebutuhan pembelian listrik tambahan, serta potensi feed-in energi ke jaringan listrik (grid). Hasil simulasi kemudian diverifikasi menggunakan perhitungan manual sederhana untuk memastikan konsistensi hasil. Margin kesalahan simulasi ditetapkan $\pm 5\%$, mengacu pada ketidakpastian data masukan seperti faktor beban harian, suhu lingkungan, dan efisiensi aktual peralatan. Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan data referensi dari studi serupa yang dipublikasikan oleh Bach et al. (2019) dan Schmidt dan Meyer (2021), guna memastikan keandalan model dan kelayakan asumsi teknis yang digunakan.

Setelah tahap simulasi, dilakukan analisis ekonomi untuk menghitung dan membandingkan total biaya energi antara sistem konvensional dan sistem CHP. Parameter ekonomi yang diperhitungkan mencakup biaya pembangkitan panas dan listrik, penghematan energi tahunan, periode pengembalian investasi (payback period), serta analisis biaya menyeluruh (full cost accounting). Tahap terakhir adalah analisis lingkungan, yang bertujuan untuk menilai sejauh mana sistem CHP mampu menurunkan konsumsi energi primer serta mengurangi emisi gas pencemar seperti CO₂, NO_x, dan CO jika dibandingkan dengan pembangkit listrik dan boiler konvensional.

Dalam penelitian ini, terdapat beberapa asumsi dan batasan studi yang perlu diperhatikan. Asumsi utama meliputi stabilitas harga bahan bakar dan listrik selama periode analisis, performa mesin CHP yang konstan sepanjang tahun, serta kondisi iklim Düsseldorf yang dianggap mewakili tahun tipikal berdasarkan data degree day. Selain itu, pengaruh degradasi peralatan dalam jangka panjang dan fluktuasi beban

akibat okupansi hotel tidak dimasukkan ke dalam model. Batasan lainnya adalah simulasi hanya dilakukan pada skala tahunan tanpa mempertimbangkan variasi musiman yang ekstrem. Oleh karena itu, hasil penelitian ini bersifat estimatif dan perlu dilakukan validasi lapangan lebih lanjut untuk memperoleh hasil yang sepenuhnya representatif terhadap kondisi operasional nyata.

Data dan Asumsi

1. Kebutuhan Listrik Tahunan: 500 MWh/a.
2. Kebutuhan Panas Tahunan: 807 MWh/a.
3. Harga Bahan Bakar: Harga minyak pemanas (net) = 23,865 ct/liter, Pajak Mineral Oil = 6,135 ct/liter.
4. Harga Listrik: Tarif dasar = €78/tahun, Tarif transfer = €39/tahun, Harga kerja = 13,13 ct/kWh (belum termasuk pajak dan biaya lainnya).
5. Biaya Pemeliharaan: €12.322/tahun untuk satu modul CHP (bernilai linear untuk modul tambahan), €100/tahun untuk peak boiler.
6. Insentif: Pengembalian pajak mineral oil untuk CHP, remunerasi untuk feed-in listrik ke grid.
7. Nilai GTZ: Digunakan untuk mendistribusikan beban panas bulanan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kinerja Energi dan Operasional

Untuk memulai perancangan sistem, distribusi panas dan listrik harian dan bulanan dipelajari. Kebutuhan listrik tertinggi sebesar 73 MWh per bulan dari Desember hingga Maret terjadi saat bulan Desember menghasilkan 177 MWh panas. Operasi sistem yang didorong oleh panas memprioritaskan produksi panas CHP dan diekspornya ke grid.

Simulasi dengan tiga skenario modul CHP menunjukkan:

- a. 1 Modul CHP: Membangkitkan 373.407 kWh listrik/tahun dan 555.262 kWh panas/tahun. Masih membutuhkan pembelian listrik sisa sebesar 136.317 kWh/tahun.
- b. 2 Modul CHP: Membangkitkan 537.205 kWh listrik/tahun dan 797.757 kWh panas/tahun. Seluruh kebutuhan listrik hotel terpenuhi, dengan kelebihan 37.205 kWh/tahun diekspor ke grid. Hanya 9.243 kWh panas puncak yang harus dicover oleh peak boiler.
- c. 3 Modul CHP: Membangkitkan 542.699 kWh listrik/tahun dan memenuhi seluruh kebutuhan panas hotel (807.000 kWh/tahun). Kelebihan listrik yang diekspor ke grid mencapai 42.699 kWh/tahun.

Analisis Ekonomi

Jika dibandingkan dengan sistem konvensional yang menggunakan pembelian listrik dari grid dan pembuatan panas melalui boiler minyak, sistem CHP menghasilkan penghematan yang signifikan, menurut perhitungan biaya energi tahunan.

Tabel 1. Perhitungan biaya energi

Skenario	Biaya Total Sistem Konvensional (€/a)	Biaya Total Sistem CHP (€/a)	Penghematan Tahunan (€/a)
1 Modul CHP	90,785.10	53,048.82	37.736,26
2 Modul CHP	90.785,10	36,528.74	54.256,36
3 Modul CHP	90.785,10	36.108,83	54.676,27

Dengan asumsi investasi untuk satu modul CHP adalah €70.000, Payback Period untuk setiap skenario dapat dihitung:

- 1 Modul: Payback Period = €70.000 / €37.736,28/tahun \approx 1,86 tahun (22 bulan).
- 2 Modul: Payback Period = €140.000 / €54.256,36/tahun \approx 2,58 tahun (31 bulan).
- 3 Modul: Payback Period = €210.000 / €54.676,27/tahun \approx 3,84 tahun (46 bulan).

Pengembalian waktu untuk tiga modul lebih lama, tetapi skenario dua modul menawarkan keseimbangan terbaik antara investasi, penghematan, dan pengembalian waktu.

Analisis Lingkungan

Implementasi sistem CHP menghasilkan pengurangan emisi dan konsumsi energi primer yang drastis. Perbandingan emisi antara pembangkit konvensional dan satu modul CHP (HTK 180) menunjukkan:

Tabel 2. Perbandingan emisi antara pembangkit konvensional dan satu modul CHP

Parameter	Pembangkit & Boiler Konvensional	1x Modul CHP (HTK 180)	Pengurangan
Emisi CO ₂	6,42 kg/jam	2,78 kg/jam	56,6%
Emisi NO _x	6,65 g/jam	44,75 g/jam	(Peningkatan)
Emisi CO	2,04 g /jam	5,45 g/jam	(Peningkatan)
Energi Primer	27,30 kw/jam	18,58 kwh/jam	31,9%

Perhitungan teoretis menunjukkan penghematan energi primer sebesar 37%. Ada peningkatan emisi NO_x dan CO pada tingkat mesin, tetapi emisi CO₂, penyebab utama perubahan iklim, telah berkurang secara signifikan. Teknologi katalis kontemporer pada mesin CHP dapat membantu mengurangi peningkatan emisi NO_x dan CO. Namun, data yang diberikan tidak membahas teknologi katalis ini secara rinci.

Pembahasan Integrasi Absorption Chiller

Walaupun data numerik tidak memberikan analisis menyeluruh tentang perhitungan pendinginan, teori menjelaskan peran penting pendinginan pengambilan dalam meningkatkan utilisasi sistem. Pada bulan-bulan panas, ketika kebutuhan panas untuk pemanas ruangan rendah, panas dari CHP dapat dialihkan ke Absorption Chiller untuk mendinginkan ruangan. Strategi ini meningkatkan load factor CHP setiap tahun, meningkatkan jumlah jam operasi, dan secara keseluruhan meningkatkan efisiensi ekonomi dan energi. Coefficient of Performance (COP) penghangat air LiBr biasanya 0,7–0,8, yang berarti bahwa setiap 1 kW energi panas dapat menghasilkan hingga 0,8 kW energi pendinginan.

Salah satu temuan utama dalam penelitian ini adalah efisiensi operasional yang ditawarkan oleh sistem CHP dibandingkan dengan sistem konvensional. Dalam penelitian ini, simulasi dilakukan untuk tiga skenario konfigurasi CHP: satu, dua, dan tiga modul. Hasilnya menunjukkan bahwa penggunaan dua atau tiga modul CHP mampu menghasilkan energi yang mencakup seluruh kebutuhan listrik dan panas hotel, bahkan dengan kelebihan energi yang dapat diekspor ke grid. Skenario 1 Modul CHP: Modul pertama hanya mampu memenuhi sebagian kebutuhan energi, yang mengakibatkan pembelian listrik tambahan sebesar 136.317 kWh/tahun. Skenario 2 Modul CHP: Konfigurasi dua modul CHP menghasilkan 37.205 kWh/tahun lebih banyak dari yang dibutuhkan untuk listrik, yang memungkinkan sebagian energi

diekspor ke grid. Skenario 3 Modul CHP: Tiga modul CHP menghasilkan listrik dan panas yang lebih dari cukup untuk memenuhi seluruh kebutuhan hotel, dengan tambahan 42.699 kWh listrik yang diekspor. Temuan ini menegaskan bahwa sistem CHP dapat mengatasi kebutuhan energi yang berfluktuasi di sektor perhotelan dan juga memberikan kelebihan energi yang dapat dimanfaatkan lebih lanjut. Kinerja sistem ini juga menunjukkan adanya efisiensi dalam penggunaan energi, dimana kelebihan panas dari proses pembangkitan listrik dapat digunakan untuk pemanas atau pendinginan, seperti dalam penerapan sistem penyejuk absorpsi.

Analisis ekonomi menunjukkan bahwa penerapan sistem CHP memberikan penghematan biaya yang signifikan jika dibandingkan dengan sistem konvensional yang memisahkan produksi listrik dan panas. Tabel perhitungan biaya energi tahunan yang diperoleh dalam penelitian ini menunjukkan bahwa penghematan tahunan dapat mencapai antara €37.736 hingga €54.676, tergantung pada jumlah modul yang diterapkan. Skenario dengan dua modul CHP dianggap sebagai pilihan yang paling optimal dari segi biaya dan waktu pengembalian, memberikan keseimbangan terbaik antara efisiensi energi dan investasi yang dibutuhkan. Penelitian ini menunjukkan bahwa meskipun investasi awal untuk implementasi sistem CHP relatif tinggi, keuntungan jangka panjang yang diperoleh dari penghematan energi dan biaya operasional menjadikan sistem ini sangat layak secara finansial.

Dari sisi lingkungan, penerapan sistem CHP terbukti dapat mengurangi konsumsi energi primer dan emisi karbon yang signifikan. Analisis menunjukkan bahwa sistem CHP mampu mengurangi emisi CO₂ hingga 56,6% dibandingkan dengan sistem konvensional. Meskipun ada peningkatan emisi NO_x dan CO pada tingkat mesin, hal ini diimbangi dengan pengurangan besar emisi CO₂, yang merupakan penyebab utama pemanasan global. Sistem CHP juga berhasil mengurangi konsumsi energi primer sebanyak 31,9%, sebuah pencapaian yang signifikan dalam konteks pengurangan jejak karbon industri perhotelan. Penggunaan teknologi katalis yang lebih efisien pada mesin CHP juga dapat membantu mengurangi peningkatan emisi NO_x dan CO, meskipun hal ini tidak dijelaskan secara rinci dalam penelitian.

Salah satu aspek penting yang dibahas dalam penelitian ini adalah integrasi sistem *Absorption Chiller* dengan CHP. Penyejuk absorpsi ini memungkinkan panas buangan dari sistem CHP digunakan untuk menghasilkan pendinginan pada bulan-bulan musim panas. Ini merupakan solusi yang sangat efisien, karena pada periode ini, kebutuhan panas untuk pemanas ruangan relatif rendah, sementara kebutuhan pendinginan meningkat. Penerapan *Absorption Chiller* meningkatkan faktor beban (*load factor*) dari sistem CHP sepanjang tahun, yang pada gilirannya memperpanjang jam operasi sistem CHP dan meningkatkan efisiensi energi dan ekonomi secara keseluruhan. Coefficient of Performance (COP) dari unit penghangat air LiBr yang digunakan dalam sistem penyejuk absorpsi ini biasanya berkisar antara 0,7 hingga 0,8, yang berarti setiap 1 kW energi panas dapat menghasilkan hingga 0,8 kW energi pendinginan.

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan sistem Combined Heat and Power (CHP) yang dikombinasikan dengan Absorption Chiller pada sektor perhotelan terbukti layak secara teknis, ekonomis, dan ekologis. Secara teknis, sistem ini mampu mengintegrasikan pembangkitan panas, listrik, dan pendinginan secara efisien sehingga meningkatkan kinerja energi bangunan secara keseluruhan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penerapan sistem CHP dapat menghemat energi primer hingga 37% dan menurunkan emisi CO₂ hingga 56,6% dibandingkan dengan sistem konvensional yang memisahkan sumber energi panas dan listrik.

Dari aspek ekonomi, seluruh skenario penggunaan modul CHP memberikan penghematan biaya energi tahunan yang signifikan, berkisar antara €37.736 hingga €54.676, dengan periode pengembalian investasi (payback period) relatif singkat, yaitu 1,8 hingga 3,8 tahun. Skenario dengan dua modul CHP diidentifikasi sebagai alternatif paling optimal karena menawarkan keseimbangan terbaik antara efisiensi, biaya investasi, dan tingkat pengembalian ekonomi. Integrasi Absorption Chiller juga memungkinkan pemanfaatan panas buangan selama musim panas, yang tidak hanya meningkatkan efisiensi termal sistem tetapi juga memperpanjang waktu operasi efektif unit CHP sehingga meningkatkan profitabilitas secara keseluruhan.

Secara ilmiah, penelitian ini memberikan kontribusi empiris dalam memperkuat bukti bahwa sistem CHPC (Combined Heat, Power, and Cooling) dapat diterapkan secara efektif di sektor perhotelan dengan iklim sedang seperti di Düsseldorf. Selain itu, penelitian ini memperluas pemahaman tentang optimasi energi lintas sektor (multi-energy optimization) melalui pendekatan simulasi dinamis menggunakan TRNSYS, yang jarang diterapkan secara spesifik untuk bangunan komersial skala menengah. Kontribusi lain dari studi ini adalah penyediaan data kuantitatif mengenai hubungan antara efisiensi termal dan ekonomi dalam penerapan sistem energi terintegrasi di sektor jasa.

Namun demikian, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan (limitations of the study). Pertama, simulasi dilakukan dengan asumsi kondisi operasi dan harga energi yang konstan sepanjang tahun, sehingga variasi musiman atau fluktuasi pasar belum sepenuhnya terakomodasi. Kedua, model belum memasukkan efek degradasi kinerja peralatan dan biaya pemeliharaan jangka panjang, yang dapat mempengaruhi hasil evaluasi ekonomi. Ketiga, validasi hasil masih terbatas pada perbandingan literatur dan belum mencakup verifikasi lapangan secara empiris. Oleh karena itu, penelitian lanjutan disarankan untuk mencakup simulasi dinamis multi-tahun, analisis sensitivitas harga energi dan faktor iklim, serta pengujian eksperimental langsung untuk meningkatkan akurasi dan generalisasi hasil terhadap kondisi nyata.

REKOMENDASI

Berdasarkan hasil penelitian, beberapa saran dapat direkomendasikan:

1. Untuk hotel: Implementasi sistem CHP dengan dua modul dan Absorption Chiller sangat disarankan untuk mencapai optimasi biaya dan energi. Perlu dilakukan studi detail lebih lanjut mengenai kebutuhan pendinginan untuk menentukan kapasitas Absorption Chiller yang tepat.

2. Untuk penelitian lanjutan: Penelitian selanjutnya dapat mensimulasikan dinamika horisan yang lebih detail, menganalisis dampak finansial dari berbagai skema insentif pemerintah yang mungkin berlaku, serta mengevaluasi penggunaan bahan bakar alternatif (seperti gas alam atau biogas) untuk mengurangi lebih lanjut emisi NO_x dan CO.
3. Kebijakan: Pemerintah didorong untuk terus mendukung insentif bagi pengadopsian teknologi CHP dan trigenerasi, seperti pengembalian pajak energi dan tarif feed-in yang menarik, untuk mempercepat transisi energi menuju sistem yang lebih efisien dan berkelanjutan.

REFERENSI

- Abbass, K., Qasim, M. Z., Song, H., Murshed, M., Mahmood, H., & Younis, I. (2022). A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(28), 42539–42559. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19718-6>
- Bach, M., Schneider, R., & Müller, H. (2019). Energy efficiency and environmental performance of combined heat and power systems in commercial buildings. *Energy Conversion and Management*, 185, 34–47.
- Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG). (1990, amended 1997). Federal Immission Control Act.
- Bagherian, M. A., & Mehranzamir, K. (2020). A comprehensive review on renewable energy integration for combined heat and power production. *Energy Conversion and Management*, 224, 113454.
- Dincer, I., & Rosen, M. A. (2020). *Exergy: Energy, environment and sustainable development* (4th ed.). Elsevier.
- Direktif Eropa tentang Efisiensi Energi (2012/27/EU) dan Kebijakan Energi Jerman (Energiewende).
- Erdem, H. H., & Akkaya, A. V. (2010). Comparative analysis of different trigeneration systems based on energy and exergy definitions. *Energy Conversion and Management*, 51(11), 2270–2281. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113454>
- Herrando, M., & Ramos, A. (2022). Photovoltaic-Thermal (PV-T) Systems for Combined Cooling, Heating and Power in Buildings: A Review. *Energies*, 15(9), 3021. <https://doi.org/10.3390/en15093021>
- Hulyadi, H., Bayani, F., Muhali, M., Khery, Y., & Gargazi, G. (2023). Correlation Profile of Cognition Levels and Student Ability to Solve Problems in Biodiesel Synthesis. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 9(6), Article 6. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v9i6.3130>
- Jansen, D., et al. (2004). Decentralized generation: A key to sustainable energy supply. Energy Research Centre of the Netherlands (ECN).
- Klein, S. A., Beckman, W. A., & Mitchell, J. W. (2021). TRNSYS 18: A transient system simulation program. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison.
- Maghanki, M. M., Ghobadian, B., Najafi, G., & Galogah, R. J. (2013). Micro combined heat and power (MCHP) technologies and applications. *Renewable and*

- Sustainable Energy Reviews*, 28, 510–524.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.053>
- Muhali, M., Hulyadi, H., Khaeruman, K., Gargazi, G., & Azmi, I. (2025). Identifying Analytical Thinking Skills in Forestry Students: Understanding Climate Change Awareness in the 21st Century Context. *Prisma Sains : Jurnal Pengkajian Ilmu Dan Pembelajaran Matematika Dan IPA IKIP Mataram*, 13, 283.
<https://doi.org/10.33394/j-ps.v13i2.13644>
- Olabi, A. G., Wilberforce, T., Sayed, E. T., Elsaid, K., & Abdelkareem, M. A. (2020). Prospects of Fuel Cell Combined Heat and Power Systems. *Energies*, 13(16), 4104. <https://doi.org/10.3390/en13164104>
- Previtali, D. (2020). Multi-objective Optimization under Uncertainty of Novel CHPC Process. In *Computer Aided Chemical Engineering* (Vol. 48, pp. 427–432). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823377-1.50072-0>
- Richter, M. (2010). Kraft-Wärme-Kopplung: Grundlagen, Technik, Betriebswirtschaft. Oldenbourg Industieverlag.
- Schmidt, L., & Meyer, T. (2021). Performance evaluation of CHP systems with absorption chillers for hotel applications in temperate climates. *Applied Thermal Engineering*, 190, 116785.
- Suttor, H., & Müller, R. (n.d.). Kraft-Wärme-Kopplung. [Buku acuan yang dikutip dalam tesis].
- Winje, D., & Witt, R. (1991). Energiewirtschaft. In *Handbuchreihe Energieberatung / Energiemanagement*. Springer Verlag.
- Wu, D. W., & Wang, R. Z. (2006). Combined cooling, heating and power: A review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 32(5–6), 459–495.
- Zhao, X., Li, H., & Zhang, Y. (2023). Economic and environmental assessment of combined heat, power, and cooling systems using TRNSYS simulation. *Renewable Energy*, 216, 135–148.