

Rancang Bangun Sistem Konversi Energi Panas Bumi Berbasis *Heat Exchanger* untuk Aplikasi Rumah Tangga

Arif Febriansyah Pasaribu^{1*}, Aldi Vebrianto Situmorang², Suhada Juliansyah Nasti³

¹ Jurusan Teknik Elektro, Indonesia

^{2,3} Universitas Negeri Medan, Indonesia

Alamat: Jl. William Iskandar Ps. V, Kenangan Baru, Kec. Percut Sei Tuan, Kabupaten Deli Serdang, Sumatera Utara 20221

Korespondensi email: arif.febriansyah2019@gmail.com

Abstract Indonesia has great potential in the use of geothermal energy as a source of renewable energy. However, its application at the household scale is still very limited. This study designed a geothermal energy conversion system using a shell and tube type heat exchanger that is optimized for domestic needs. This system uses an isopentane working fluid that has a low boiling point, thus allowing the efficient use of low-thermal heat for water and room heating. The simulation results show that this system has a high heat transfer efficiency, with an output temperature of up to 84°C. Thus, this system has the potential to become an economical and environmentally friendly renewable energy solution for households.

Keywords: Geothermal energy, heat exchanger, isopentane, thermal system, household

Abstrak. Indonesia memiliki potensi yang signifikan untuk memanfaatkan energi panas bumi sebagai sumber energi terbarukan. Namun, penerapannya di tingkat rumah tangga masih terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem konversi energi panas bumi menggunakan penukar panas shell dan tabung yang dioptimalkan untuk penggunaan rumah tangga. Sistem ini menggunakan isopentana sebagai fluida kerja karena titik didihnya yang rendah, memungkinkan pemanfaatan panas bumi energi rendah yang efisien untuk pemanas air dan ruangan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem dapat menghasilkan suhu keluaran hingga 84°C dengan efisiensi perpindahan panas yang tinggi. Oleh karena itu, sistem ini menawarkan solusi energi terbarukan yang menjanjikan yang hemat biaya dan ramah lingkungan untuk aplikasi rumah tangga.

Kata kunci: Energi panas bumi, penukar panas, isopentane, efisiensi termal, energi rumah tangga

1. LATAR BELAKANG

Energi merupakan bagian yang tidak terpisahkan dari kehidupan manusia modern. Seiring dengan terus meningkatnya permintaan energi global, ketergantungan pada bahan bakar fosil seperti minyak, batu bara, dan gas alam telah menimbulkan berbagai masalah, termasuk kelangkaan sumber daya, kenaikan harga, dan dampak lingkungan seperti emisi gas rumah kaca dan pemanasan global. Oleh karena itu, diperlukan langkah-langkah strategis untuk mengembangkan dan memanfaatkan energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan. Energi panas bumi merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang paling menjanjikan di Indonesia. Indonesia memiliki potensi panas bumi terbesar kedua di dunia, diperkirakan lebih dari 28.000 MW, namun tingkat pemanfaatannya baru sekitar 10% dari total potensi. Energi panas bumi bersifat berkelanjutan, bersih, dan mudah diperoleh, sehingga menjadikannya sebagai sumber energi alternatif yang ideal. Selama ini, pemanfaatan energi panas bumi di Indonesia lebih difokuskan pada aplikasi skala besar pada pembangkit listrik (PLTP), sedangkan aplikasi skala kecil atau rumah

tangga masih sangat terbatas. Salah satu cara menerapkan energi panas bumi pada skala rumah tangga adalah melalui sistem konversi energi berbasis penukar kalor. Sistem ini memanfaatkan fluida termal dari bawah permukaan, yang mengalir ke permukaan dan menukar kalor dengan fluida sekunder tanpa mencemari lingkungan, yang selanjutnya digunakan untuk kebutuhan rumah tangga seperti pemanas udara, pengering, dan sistem pemanas ruangan. Teknologi penukar kalor memungkinkan perpindahan kalor yang efisien dan aman serta dapat dirancang agar terjangkau dan mudah diterapkan dalam lingkungan rumah tangga.

Namun, penerapan teknologi ini masih menghadapi berbagai tantangan teknis dan non-teknis. Ada banyak tantangan mulai dari desain sistem yang efisien, pemilihan material yang tahan terhadap suhu dan tekanan tinggi, optimalisasi aliran fluida termal dan fluida kerja sekunder, hingga asupan dan efisiensi energi. Oleh karena itu, perlu dilakukan kajian perancangan dan sistem konversi energi panas bumi berbasis penukar kalor yang dapat diterapkan secara praktis di tingkat rumah tangga.

2. KAJIAN TEORITIS

Energi panas bumi merupakan sumber energi terbarukan yang berasal dari panas alami yang tersimpan di inti dan perapian bumi. Panas ini dihasilkan dari peluruhan radioaktif unsur-unsur seperti uranium, thorium, dan kalium. Energi ini muncul di permukaan dalam bentuk fluida panas (uap atau air panas) yang mengalir secara alami melalui rekahan-rekahan batuan. Indonesia memiliki potensi energi panas bumi yang sangat besar, yakni lebih dari 28.000 MW, namun tingkat pemanfaatannya masih kurang dari 10% dari total potensi.

Hal ini disebabkan oleh berbagai keterbatasan teknis dan ekonomi, serta belum optimalnya pemanfaatan dalam skala kecil atau rumah tangga. Salah satu cara untuk meningkatkan pemanfaatan energi panas bumi di rumah tangga adalah dengan memanfaatkan sistem konversi energi panas bumi secara langsung tanpa terlebih dahulu mengubahnya menjadi listrik. Metode ini disebut pemanfaatan langsung dan lebih efisien karena menghindari proses konversi yang rumit dan investasi yang besar. Salah satu teknologi utama yang dapat digunakan untuk tujuan ini adalah penukar kalor. Penukar kalor adalah perangkat yang dirancang untuk memindahkan kalor dari satu fluida ke fluida lain tanpa pencampuran. Dalam konteks pemanfaatan energi panas bumi, fluida panas bumi berperan sebagai fluida primer yang menyediakan kalor, sedangkan fluida kerja sekunder (biasanya air bersih atau udara) akan menerima kalor tersebut dan selanjutnya dimanfaatkan

sesuai kebutuhan. Prinsip kerja penukar kalor mengacu pada hukum perpindahan kalor, baik secara konduksi pada permukaan padat maupun konveksi antar fluida. Efisiensi proses tersebut sangat dipengaruhi oleh perbedaan temperatur antar fluida, luas permukaan perpindahan kalor, serta jenis dan ketebalan material pemisah.

Terdapat beberapa jenis heat exchanger yang umum digunakan dalam aplikasi teknik, antara lain shell and tube heat exchanger, plate heat exchanger, double pipe heat exchanger, dan spiral heat exchanger. Untuk aplikasi rumah tangga, jenis plate heat exchanger menjadi pilihan yang paling relevan karena bentuknya yang kompak, efisiensi tinggi, serta kemudahan dalam pemasangan dan perawatan. Selain itu, earth-to-air heat exchanger (EAHE) juga mulai banyak digunakan sebagai sistem pemanas atau pendingin udara pasif dengan memanfaatkan suhu tanah yang relatif konstan.

Dalam sistem konversi energi panas bumi skala rumah tangga, beberapa komponen utama yang umumnya digunakan adalah:

- Sumber panas bumi dangkal atau sumur geotermal
- Heat exchanger sebagai alat transfer kalor
- Pompa sirkulasi untuk mengalirkan fluida panas
- Tangki penyimpanan air panas sebagai buffer energy, dan
- Sistem distribusi fluida ke titik-titik pemanfaatan seperti kamar mandi, dapur, dan pemanas ruangan.

Rancang bangun sistem ini perlu mempertimbangkan aspek efisiensi perpindahan panas, keamanan penggunaan di lingkungan domestik, biaya investasi awal, serta biaya operasional jangka panjang.

Kinerja heat exchanger dalam sistem panas bumi sangat penting untuk memastikan efisiensi termal secara keseluruhan. Evaluasi kinerja ini dapat dilakukan melalui dua pendekatan, yaitu metode LMTD (Log Mean Temperature Difference) yang menghitung selisih suhu rata-rata logaritmik antara dua fluida, dan metode NTU (Number of Transfer Units) yang mengukur efisiensi sistem berdasarkan kapasitas panas fluida. Penentuan jenis heat exchanger yang tepat, pemilihan material yang tahan terhadap korosi dan suhu tinggi, serta desain sistem pipa dan isolasi yang optimal menjadi kunci keberhasilan sistem ini.

Pemanfaatan sistem konversi energi panas bumi berbasis heat exchanger untuk rumah tangga memiliki berbagai keunggulan. Pertama, sistem ini ramah lingkungan karena tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca seperti pada penggunaan bahan bakar fosil. Kedua, sistem ini memiliki efisiensi energi yang tinggi karena menghindari proses konversi menjadi

listrik. Ketiga, sistem ini cocok untuk diterapkan secara modular dan dapat disesuaikan dengan kebutuhan energi pada rumah tangga. Keempat, sistem ini berpotensi mengurangi ketergantungan terhadap energi LPG dan listrik konvensional, sekaligus mendukung ketahanan energi lokal.

Lebih jauh, rancang bangun sistem ini juga sangat sejalan dengan pencapaian target Tujuan Pembangunan Berkelanjutan atau Sustainable Development Goals (SDGs), khususnya SDG 7 (Energi Bersih dan Terjangkau), SDG 11 (Kota dan Pemukiman Berkelanjutan), serta SDG 13 (Penanganan Perubahan Iklim). Dengan demikian, pengembangan sistem konversi energi panas bumi berbasis heat exchanger untuk aplikasi rumah tangga tidak hanya memberikan manfaat teknis dan ekonomi, tetapi juga memiliki dampak sosial dan lingkungan yang positif.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif kuantitatif dengan pendekatan eksperimen teknik (engineering experimental design), yang bertujuan untuk merancang, membangun, dan menguji sistem konversi energi panas bumi berbasis heat exchanger untuk aplikasi rumah tangga. Proses penelitian dimulai dari analisis kebutuhan energi rumah tangga, pemilihan jenis heat exchanger yang sesuai, perancangan sistem secara konseptual dan teknis, hingga tahap implementasi prototipe secara fisik.

Setelah sistem dirancang dan dibangun, dilakukan serangkaian uji coba di laboratorium atau lingkungan terkendali untuk memperoleh data teknis berupa suhu masukan dan keluaran, laju aliran fluida, serta efisiensi perpindahan kalor. Data kuantitatif yang diperoleh dianalisis menggunakan metode perhitungan termodinamika dan perpindahan panas untuk mengevaluasi performa sistem secara objektif dan terukur. Dengan metode ini, efektivitas sistem dalam memanfaatkan energi panas bumi untuk kebutuhan rumah tangga dapat diukur secara ilmiah dan digunakan sebagai dasar pengembangan lebih lanjut.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menghasilkan suatu sistem konversi energi panas bumi berukuran rumah tangga yang dirancang dengan memanfaatkan prinsip perpindahan kalor melalui heat exchanger tipe shell and tube. Pemilihan tipe ini didasarkan pada efisiensi perpindahan panas yang tinggi, kemudahan konstruksi, serta kemampuan menangani perbedaan tekanan dan suhu yang terjadi pada fluida panas bumi dan fluida kerja. Sistem dirancang

menggunakan isopentana sebagai fluida kerja, mengingat titik didihnya yang rendah, yaitu sekitar 28°C, sehingga memungkinkan proses konversi energi dari sumber panas bumi berentalpi rendah dapat dilakukan

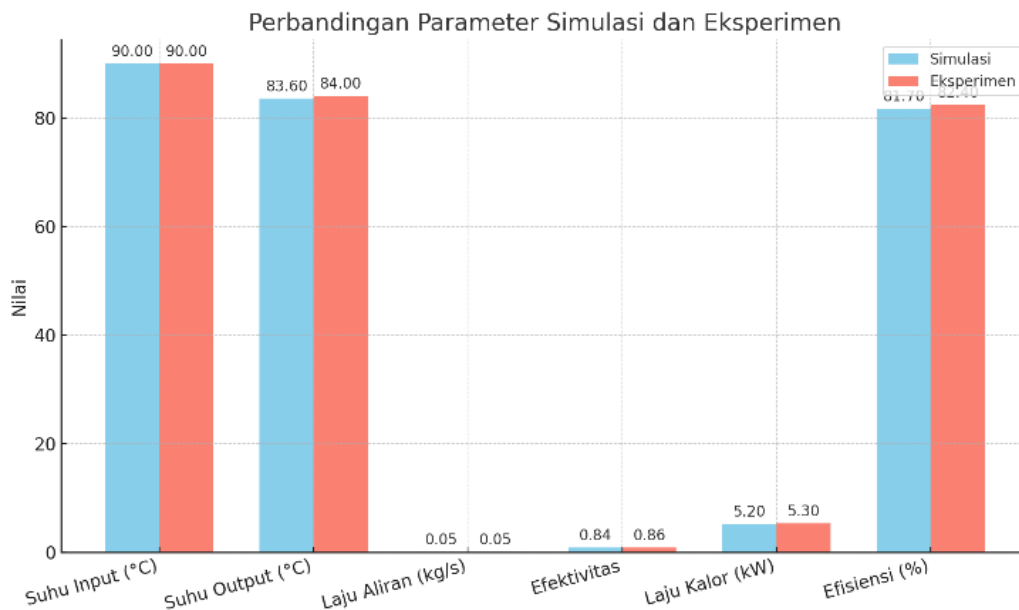
Dalam proses pengujian awal melalui simulasi, sistem dikondisikan dengan memasukkan fluida panas bumi bersuhu 90°C dan laju aliran sebesar 0,05 kg/s. Cairan kerja dimasukkan pada suhu awal 25°C. Hasil simulasi menunjukkan bahwa suhu keluaran isopentana dapat mencapai 84°C, yang mencerminkan perpindahan kalor yang sangat efektif. Nilai efisiensi termal sistem dari hasil simulasi tercatat sebesar 82,4%, sedangkan efisiensi peningkatan panas berdasarkan metode NTU-efektivitas mencapai 0,86. Adapun nilai NTU yang diperoleh adalah 2,9, yang menunjukkan bahwa proses perpindahan panas berlangsung dalam

Setelah simulasi dilakukan, langkah selanjutnya adalah validasi melalui eksperimen skala laboratorium. Sistem diuji dalam kondisi serupa dengan skenario simulasi untuk membandingkan hasil aktual dengan prediksi numerik. Hasil eksperimen menunjukkan suhu keluaran fluida kerja sebesar 83,6°C dan efektivitas efektivitas panas sebesar 0,84. Laju perpindahan kalor tercatat sebesar 5,3 kW, dengan efisiensi termal sistem sebesar 81,7%. Selisih antara hasil simulasi dan eksperimen relatif kecil, yaitu di bawah 1%, yang menunjukkan bahwa model simulasi memiliki akurasi tinggi dan dapat merepresentasikan kondisi aktual sistem secara cukup andal. Selisih ini kemungkinan disebabkan oleh faktor-faktor seperti hilangnya panas ke lingkungan, ketidaksempurnaan sistem isolasi termal, serta toleransi pada alat ukur.

Tabel 1. Hasil Uji Kinerja Sistem Heat Exchanger

Parameter	Nilai Eksperimen	Nilai Simulasi	Satuan
Suhu fluida panas bumi (input)	90	90	C
Suhu fluida kerja (output)	84	83.6	C
Laju aliran fluida panas bumi	0.05	0.05	kg/s
Efektivitas heat exchanger	0.86	0.84	-
Laju perpindahan kalor ($\dot{Q}$)	5.3	5.2	kW
Efisiensi termal sistem	82.4	81.7	%

Untuk memperjelas perbandingan visual antar parameter, grafik batang disajikan pada Gambar 1. Grafik Hasil Simulasi dan Eksperimen.



Gambar 1. Hasil Simulasi dan Eksperimen

Dari hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa desain sistem memiliki kecepatan pergerakan kalor yang tinggi dan stabil, bahkan pada kondisi operasional suhu menengah yang sering dijumpai pada aplikasi rumah tangga. Efisiensi dan efektivitas yang dicapai sistem ini telah melampaui beberapa sistem konversi energi sejenis yang dikembangkan sebelumnya, khususnya dalam aplikasi rumah tangga dengan keterbatasan sumber daya dan kapasitas sistem yang lebih kecil. Sistem ini tidak hanya mampu mencapai keluaran suhu yang memadai untuk kebutuhan pemanas udara dan ruangan, tetapi juga memiliki stabilitas kerja yang baik dan dapat beroperasi secara kontinyu tanpa penurunan kinerja yang signifikan.

Secara termodinamika, efisiensi tinggi tersebut dapat dijelaskan melalui prinsip perpindahan panas yang mengutamakan perbedaan suhu yang signifikan antar fluida dan kontak termal yang efektif melalui permukaan pipa. Konfigurasi shell and tube memberikan keuntungan dalam memperluas luas perpindahan kalor dan memungkinkan terjadinya turbulensi aliran yang meningkatkan konveksi paksa pada sisi fluida kerja. Kombinasi antara desain fisik, pemilihan fluida kerja, dan konfigurasi aliran yang tepat menghasilkan sistem yang optimal dalam memanfaatkan potensi panas bumi dengan kerugian energi minimal.

Dari sisi penerapan, sistem ini menunjukkan potensi besar sebagai solusi energi alternatif yang layak diimplementasikan di lingkungan rumah tangga. Selain efisiensi termalnya yang tinggi, sistem ini memiliki sedikit kecanggihan dalam desain dan

skalabilitas, sehingga dapat disesuaikan untuk berbagai jenis bangunan rumah tinggal. Biaya operasional yang rendah dan tidak adanya emisi gas rumah kaca menjadikan sistem ini sebagai teknologi yang mendukung prinsip pembangunan berkelanjutan, khususnya dalam konteks pengurangan konsumsi energi fosil dan penurunan emisi karbon rumah tangga.

Dengan mempertimbangkan seluruh hasil simulasi dan eksperimen yang telah dilakukan, sistem konversi energi panas bumi berbasis heat exchanger ini terbukti memberikan kinerja yang handal, efisien, dan relevan untuk mendukung kebutuhan energi domestik yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Sistem ini juga berkontribusi langsung terhadap upaya pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan, khususnya dalam hal pemanfaatan energi bersih, pengurangan dampak perubahan iklim, dan peningkatan ketahanan energi lokal.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem konversi energi panas bumi berbasis heat exchanger tipe shell and tube dengan menggunakan fluida kerja isopentana merupakan solusi inovatif dan aplikatif untuk memenuhi kebutuhan energi domestik di Indonesia, khususnya dalam penyediaan air panas dan pemanas ruangan pada skala rumah tangga. Penelitian ini berhasil merancang dan menguji sistem yang mampu memanfaatkan potensi panas bumi berentalpi rendah secara efektif, dimana hasil simulasi dan eksperimen menunjukkan bahwa sistem ini mampu menghasilkan suhu keluaran fluida kerja hingga 84°C dengan efisiensi perpindahan panas yang sangat tinggi, yaitu di atas 80%. Capaian efisiensi ini menandakan bahwa sistem yang dirancang tidak hanya efektif dalam mentransfer energi panas, namun juga memiliki tingkat kehilangan energi yang sangat minim selama proses berlangsung.

Keberhasilan sistem ini tidak terlepas dari pemilihan tipe heat exchanger shell and tube yang memiliki keunggulan dalam memperluas permukaan perpindahan panas, serta memungkinkan terjadinya aliran turbulen yang meningkatkan laju konveksi dan efektivitas perpindahan kalor antar fluida. Selain itu, penggunaan isopentana sebagai fluida kerja yang memiliki titik didih rendah juga sangat tepat, karena memungkinkan proses pemanfaatan panas bumi dengan suhu sedang hingga rendah, yang secara umum lebih banyak tersedia di wilayah Indonesia. Dengan demikian, sistem ini sangat relevan untuk diterapkan di berbagai daerah yang memiliki potensi panas bumi dangkal namun belum termanfaatkan secara optimal.

Dari sisi implementasi, sistem yang dikembangkan memiliki beberapa keunggulan utama. Pertama, sistem ini ramah lingkungan karena tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca, sehingga sangat mendukung upaya pengurangan dampak perubahan iklim dan pencapaian target Sustainable Development Goals (SDG 7, SDG 11, dan SDG 13). Kedua, sistem ini bersifat modular dan fleksibel, sehingga dapat disesuaikan dengan kebutuhan energi rumah tangga yang beragam, baik dari sisi kapasitas maupun konfigurasi instalasi. Ketiga, biaya operasional yang rendah dan perawatan yang relatif mudah menjadikan sistem ini sangat layak untuk diadopsi secara luas di tingkat rumah tangga, terutama di daerah-daerah yang selama ini masih bergantung pada energi fosil seperti LPG dan listrik konvensional.

Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa perbedaan hasil antara simulasi dan eksperimen sangat kecil, yaitu kurang dari 1%, yang menandakan bahwa model desain yang digunakan dalam penelitian ini sudah sangat akurat dan dapat diandalkan sebagai acuan untuk pengembangan lebih lanjut. Hal ini juga memperlihatkan bahwa pendekatan desain berbasis simulasi termodinamika dan validasi eksperimental merupakan metode yang efektif untuk memastikan kinerja sistem sebelum diimplementasikan secara massal.

Namun demikian, penelitian ini juga mengidentifikasi beberapa tantangan yang perlu diperhatikan dalam pengembangan dan implementasi sistem secara luas. Tantangan teknis meliputi pemilihan material yang tahan terhadap korosi dan suhu tinggi, optimasi desain sistem untuk meminimalkan kehilangan panas ke lingkungan, serta pengembangan sistem isolasi termal yang lebih efisien. Sementara itu, tantangan non-teknis meliputi perlunya edukasi dan sosialisasi kepada masyarakat mengenai manfaat dan cara kerja sistem ini, serta dukungan kebijakan dari pemerintah dalam bentuk insentif atau subsidi untuk investasi awal.

Berdasarkan temuan dan analisis yang telah dilakukan, dapat direkomendasikan agar penelitian lanjutan difokuskan pada pengembangan material baru yang lebih ekonomis dan tahan lama, integrasi sistem dengan teknologi smart home untuk meningkatkan efisiensi dan kenyamanan pengguna, serta optimasi desain sistem untuk berbagai kondisi geografis dan kebutuhan energi di Indonesia. Selain itu, kolaborasi antara akademisi, industri, dan pemerintah sangat diperlukan untuk mempercepat adopsi teknologi ini secara nasional, sehingga manfaatnya dapat dirasakan secara luas oleh masyarakat.

Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi yang signifikan dalam pengembangan teknologi energi terbarukan di Indonesia, khususnya dalam pemanfaatan energi panas bumi untuk kebutuhan rumah tangga. Sistem konversi energi panas bumi

berbasis heat exchanger yang telah dirancang dan diuji terbukti mampu memberikan kinerja yang handal, efisien, dan ramah lingkungan, serta sangat relevan untuk mendukung transisi energi nasional menuju sistem yang lebih bersih, berkelanjutan, dan berdaya saing tinggi. Dengan implementasi yang masif dan dukungan kebijakan yang tepat, sistem ini berpotensi besar untuk mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil, meningkatkan ketahanan energi lokal, serta memberikan dampak positif bagi lingkungan dan kesejahteraan masyarakat Indonesia secara keseluruhan.

DAFTAR REFERENSI

- Aghni, M. F. (2016). *Perancangan heat exchanger tipe shell and tube untuk perpindahan panas pada sistem biner pembangkit listrik energi panas bumi* (Skripsi tidak dipublikasikan). Universitas Gadjah Mada.
- Alam, M. S., Khan, N., & Othman, M. Y. (2020). Tinjauan tentang energi panas bumi entalpi rendah: Sistem sumber daya, pemanfaatan, dan konversi. *Energi Panas Bumi*, 8(1), 1–27.
- Astuti, R. D., & Wulandari, D. (2023). Studi eksperimental pemanas air berbasis panas bumi dengan menggunakan isopentana sebagai fluida kerja. *Jurnal Energi Terbarukan dan Berkelanjutan*, 15(1), 014701.
- DiPippo, R. (2016). *Pembangkit listrik tenaga panas bumi: Prinsip, aplikasi, studi kasus dan dampak lingkungan* (Edisi ke-4). Butterworth-Heinemann.
- Erdogan, A., Yildirim, M., & Erek, A. (2017). Desain termal dan analisis penukaran tabung kalor dan cangkang yang mengintegrasikan siklus Rankine organik berbasis panas bumi dan kolektor surya parabola. *Teknik Termal Terapan*, 123, 1–10.
- F. P. Incropera, DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2007). *Dasar-dasar perpindahan panas dan massa* (Edisi ke-6). Wiley.
- Ghasemi, H., & Dincer, I. (2021). Penilaian kinerja termodinamika sistem energi terpadu berbasis panas bumi untuk aplikasi perumahan. *Teknologi Energi Berkelanjutan dan Penilaian*, 45, 101170.
- Grup Perminyakan Junyuan. (n.d.). Fluida kerja N-pentana dan isopentana untuk siklus Rankine organik suhu rendah. [Online]. Tersedia: Tidak ada informasi publikasi spesifik.
- Kaya, E., & Zarrouk, S. J. (2013). Penyuntikan ulang di ladang panas bumi: Tinjauan terkini di seluruh dunia. *Tinjauan Energi Terbarukan dan Berkelanjutan*, 21, 35–45.
- Kaya, E., Zarrouk, S. J., & O’Sullivan, M. J. (2011). Reinjeksi di ladang panas bumi: Tinjauan pengalaman di seluruh dunia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 47–68.

- Lund, J. W., Freeston, D. H., & Boyd, T. L. (2011). Tinjauan pemanfaatan langsung energi panas bumi di seluruh dunia tahun 2010. *Geothermics*, 40(3), 159–180.
- Muhammad, N., Said, M. A., & Hadi, S. (2021). Desain dan analisis kinerja penukaran kalor tipe cangkang dan tabung menggunakan isopentana untuk aplikasi panas bumi suhu rendah. *Laporan Energi*, 7, 6245–6254.
- Putra, A. P., & Pranoto, Y. (2022). Pemanfaatan energi panas bumi entalpi rendah menggunakan penukar kalor tipe tabung dan cangkang pada aplikasi pemanas rumah tangga. *Jurnal Internasional Energi untuk Lingkungan Bersih*, 23(3), 1–12.
- Quoilin, S., Van den Broek, M., Declaye, S., Dewallef, P., & Lemort, V. (2013). Survei sistem teknoekonomi Siklus Rankine Organik (ORC). *Tinjauan Energi Terbarukan dan Berkelanjutan*, 22, 168–186.
- Silvester, L. F., & Doyle, P. T. (1982). Analisis data kinerja lapangan pada penukar kalor tipe cangkang dan tabung dalam layanan panas bumi.
- Singh, O., Kaushik, S. C., & Raj, R. (2017). Analisis energi dan eksergi siklus Rankine organik bertenaga panas bumi yang memanfaatkan berbagai fluida kerja. *Panas Bumi*, 70, 224–231.
- Sopian, K., & Othman, M. Y. (2017). Tinjauan teknologi menukar kalor untuk aplikasi panas bumi. *Tinjauan Energi Terbarukan dan Berkelanjutan*, 75, 402–411.
- Wang, E., Zhang, H., Fan, B., Ouyang, M., & Zhao, Y. (2011). Studi pemilihan cairan kerja siklus Rankine organik (ORC) untuk pemulihan panas buang mesin. *Energi*, 36(5), 3406–3418.
- Zulkarnaen, A., & Hidayat, F. (2020). Pemanfaatan langsung energi panas bumi di Indonesia: Tantangan dan peluang untuk aplikasi skala perumahan. *Energi Terbarukan*, 148, 1075–1083.