SINERGI Polmed: JURNAL ILMIAH TEKNIK MESIN
Homepage jurnal: http://ojs.polmed.ac.id/index.php/Sinergi/index

# INOVASI DAN STRATEGI PENGEMBANGAN PENUKAR KALOR KOMPAK: INTEGRASI MANUFAKTUR ADITIF, NANOFLUIDA, MATERIAL PERUBAHAN FASE, DAN ANALISIS EKSERGI

**Ulil Amri Isnain Hasibuan[a*], Azridjal Aziz[b]**

[a]*Program Studi Magister Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Riau, Kampus Bina Widya km 12,5 Simpang Baru, Panam, Pekanbaru 28293, Indonesia*
[b]*Program Studi Rekayasa Berkelanjutan, Fakultas Teknik, Universitas Riau, Kampus Bina Widya km 12,5 Simpang Baru, Panam, Pekanbaru 28293, Indonesia*

**Penulis korespondensi: ulilamrihasibuan8@gmail.com; ulil.amri8028@grad.unri.ac.id, (U.A.I. Hasibuan), Tel.: +6282-1732-20459*

INFO ARTIKEL

*Riwayat artikel:*
Diajukan pada 16 Juni 2026
Direvisi pada 12 Oktober 2026
Disetujui pada 21 Oktober 2026
Tersedia daring pada 17 November 2026

*Kata kunci:*
Penukar kalor kompak, manufaktur aditif, nanofluida, material perubahan fase, analisis eksergi.

*Keywords:*
*Compact heat exchanger, additive manufacturing, nanofluids, phase change materials, exergy analysis.*

ABSTRAK

Transisi menuju sistem energi berefisiensi tinggi menuntut penggunaan penukar kalor kompak (CHE) yang mampu beroperasi pada kondisi suhu dan tekanan tinggi. Namun, kapabilitas material dan metode manufaktur konvensional kerap menjadi faktor pembatas utama. Artikel ini bertujuan menyintesis arah dan strategi optimasi desain CHE yang dilaporkan dalam literatur mutakhir; istilah "optimasi" dalam kajian ini merujuk pada sintesis strategi tersebut, bukan pada optimasi numerik atau eksperimental baru. Metode yang digunakan adalah tinjauan pustaka terstruktur yang mengadaptasi alur PRISMA 2020: dari 210 rekaman awal, 59 publikasi diinklusi dan dianalisis secara analitis-sintesis pada tiga pilar, yaitu inovasi struktural, rekayasa media termal, dan evaluasi termodinamika. Hasil sintesis menunjukkan bahwa paduan kinerja tinggi yang dicetak dengan manufaktur aditif memungkinkan pembuatan matriks monolitik, termasuk geometri Permukaan Minimal Periodik Tiga Arah (TPMS). Salah satu studi primer melaporkan rancangan rekuperator hasil fusi serbuk laser untuk tekanan sisi dingin 250 bar pada 800 °C, meskipun angka tersebut merupakan nilai desain. Kekasaran permukaan, cacat internal, pembuangan serbuk, dan biaya masih membatasi penerapan industrinya. Pada aspek media termal, dispersi *nanofluid* dan integrasi material perubahan fase (PCM) dilaporkan dapat meningkatkan laju perpindahan panas dan kapasitas penyimpanan energi laten pada kondisi uji tertentu. Namun, sintesis literatur menunjukkan bahwa keunggulan media termal ini tidak bersifat universal: peningkatan viskositas, aglomerasi partikel, serta pengaruh kondisi operasi (seperti rezim aliran dan medan eksternal) dapat menggerus perolehan termal apabila tidak dioptimalkan. Oleh karena itu, kajian ini menyarankan agar evaluasi termodinamika dilengkapi dengan analisis eksergi guna meminimalkan generasi entropi dan menyeimbangkan intensifikasi termal terhadap penalti hidraulik. Kontribusi artikel ini berupa kerangka konseptual yang mengintegrasikan ketiga pilar tersebut sebagai acuan awal perancangan CHE untuk sistem konversi daya dan fasilitas pemulihan limbah panas industri.

ABSTRACT

*The transition towards high-efficiency energy systems demands the use of Compact Heat Exchangers (CHE) capable of operating under high temperature and pressure. However, the capabilities of conventional materials and manufacturing methods often act as primary limiting factors. This article aims to synthesize the directions and strategies of CHE design optimization reported in recent literature; here, "optimization" refers to a synthesis of these strategies rather than to new numerical or experimental optimization. A structured literature review adapted from the PRISMA 2020 flow was employed: from 210 initial records, 59 publications were included and analyzed using an analytical-synthesis approach across three pillars, namely structural innovation, thermal media engineering, and thermodynamic evaluation. The synthesis indicates that high-performance alloys processed by additive manufacturing enable monolithic matrices, including Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) geometries. One primary study reports a laser powder bed fusion recuperator designed for a cold-side pressure of 250 bar at 800 °C, although this figure is a design value. Surface roughness, internal defects, powder removal, and cost still limit industrial adoption. Regarding thermal media, the dispersion of nanofluids and the integration of Phase Change Materials (PCM) have been reported to enhance heat transfer rates and latent*

*energy storage capacity under specific test conditions. Nevertheless, the synthesis indicates that these benefits are not universal: increased viscosity, particle agglomeration, and operating conditions (such as flow regime and external fields) may offset the thermal gains if left unoptimized. Accordingly, this study suggests that thermodynamic evaluation be complemented by exergy analysis to minimize entropy generation and to balance thermal intensification against hydraulic penalties. The contribution of this article is a conceptual framework that integrates the three pillars as an initial reference for designing CHEs for power conversion systems and industrial waste heat recovery facilities.*

## 1. PENGANTAR

Kebutuhan akan sistem energi yang lebih efisien mendorong penggunaan penukar kalor kompak (*compact heat exchanger*, CHE) pada pembangkit daya, refrigerasi, dan pemulihan panas buang. Pada aplikasi tersebut, perancang dituntut menyediakan laju perpindahan panas yang memadai tanpa menambah ukuran dan massa peralatan secara berlebihan. CHE menjadi salah satu pilihan karena menawarkan luas permukaan perpindahan panas yang besar dalam volume relatif kecil.

Kekompakan penukar kalor dapat dinyatakan melalui kerapatan luas permukaan (β), yaitu perbandingan antara luas permukaan perpindahan panas pada satu sisi fluida (A) dan volume penukar kalor (V): $\beta = A/V$, dengan satuan $m^2/m^3$. Shah dan Sekulić (2003) mengemukakan kriteria praktis sekitar $\beta \geq 700\ m^2/m^3$ untuk sisi gas dan $\beta \geq 400\ m^2/m^3$ untuk sisi cairan atau aliran dengan perubahan fase; klasifikasi sejenis juga dibahas oleh Ajeeb dan Murshed (2022). Nilai tersebut merupakan pedoman klasifikasi, bukan batas fisik yang berlaku untuk setiap konfigurasi. Klasifikasi berdasarkan diameter hidraulik juga memiliki ambang berbeda. Kerapatan permukaan yang tinggi membantu meningkatkan kapasitas pertukaran panas per satuan volume, tetapi perlu dinilai bersama kehilangan tekanan dan kebutuhan daya pemompaan.

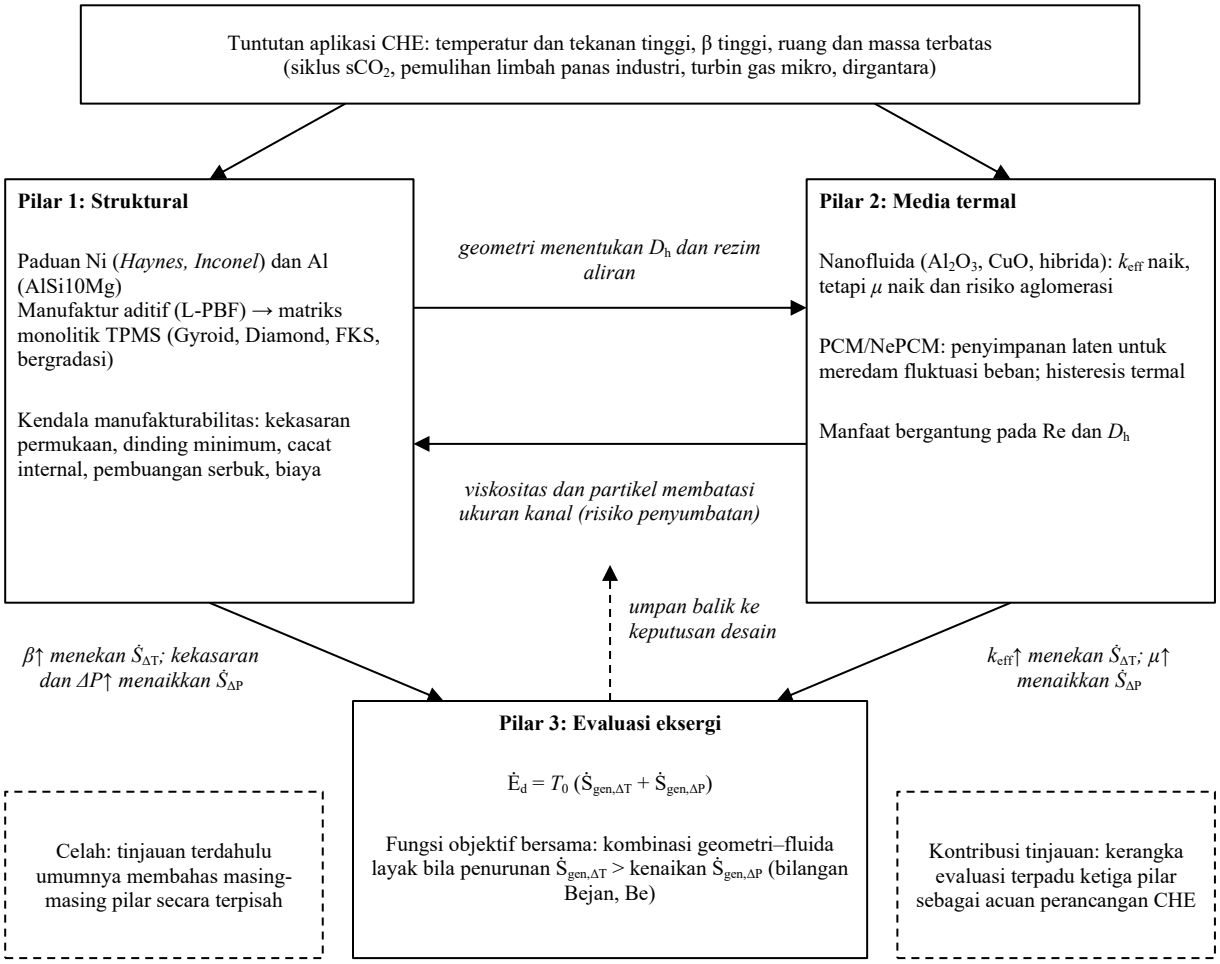
CHE digunakan pada beragam sistem yang membatasi ruang, massa, dan kebutuhan energi. Dalam siklus karbon dioksida superkritis ($sCO_2$), perangkat ini berfungsi sebagai rekuperator, sedangkan pada sistem propulsi hipersonik berbahan bakar hidrogen dapat digunakan sebagai pendingin awal (precooler) (Meng dkk., 2021). Aplikasi lain mencakup turbin gas mikro dan sistem dirgantara yang membutuhkan perpindahan panas intensif. Geometri triply periodic minimal surface (TPMS) hasil manufaktur aditif telah diteliti sebagai alternatif untuk meningkatkan kinerja aliran dan termal, meskipun keunggulannya tetap bergantung pada geometri serta kondisi pengujian (Su dkk., 2025).

Di sektor industri, CHE juga berpotensi meningkatkan pemanfaatan panas buang. Panas dari gas keluaran proses dapat dipindahkan ke udara pembakaran atau fluida kerja lain sehingga kebutuhan energi primer berkurang. Akan tetapi, manfaat aktual bergantung pada temperatur sumber panas, kondisi operasi, kebutuhan pemompaan, dan integrasi peralatan ke dalam sistem.

Penerapan CHE pada temperatur dan tekanan tinggi menghadirkan tantangan desain yang tidak sederhana. Dinding saluran yang tipis memperpendek lintasan perpindahan panas, tetapi dapat mengurangi ketahanan mekanis terhadap tekanan internal, tegangan termal, dan deformasi rambat (creep). Pada konstruksi konvensional, sambungan hasil pematrian (brazing) atau pengelasan juga dapat menjadi lokasi konsentrasi tegangan ketika peralatan mengalami siklus pemanasan dan pendinginan (Das dkk., 2024). Di sisi lain, sifat fluida kerja serta fluktuasi beban panas memengaruhi efektivitas keseluruhan sistem. Oleh sebab itu, pengembangan CHE tidak cukup hanya berfokus pada peningkatan koefisien perpindahan panas.

Sejumlah artikel tinjauan telah membahas pengembangan CHE dari perspektif berbeda. Adam dkk. (2020) mengulas modifikasi geometri penukar kalor sirip-tabung, sedangkan Meng dkk. (2021) serta Yeranee dan Rao (2022) menelaah teknologi mikromanufaktur dan saluran berbasis TPMS. Careri dkk. (2023) menitikberatkan pada manufaktur aditif untuk aplikasi dirgantara. Kajian mengenai nanofluida banyak membahas sifat termofisik dan perolehan perpindahan panas dengan geometri tertentu (Ajeeb & Murshed, 2022; Louis dkk., 2022; Pereira dkk., 2023; Mirahmad dkk., 2025). Sementara itu, Ashrafizadeh (2019) dan Łach (2026) menyoroti evaluasi Hukum Kedua serta pemodelan entropi. Literatur tersebut menyediakan landasan yang kuat, tetapi keterkaitan antara kemampuan manufaktur, karakteristik media termal, dan kerugian eksergi masih perlu disajikan dalam satu kerangka desain yang jelas.

Artikel ini merupakan sintesis literatur, bukan laporan eksperimen atau optimasi numerik baru. Kontribusi utamanya adalah kerangka konseptual pada Gambar 1 yang menghubungkan tiga pilar: (1) pemilihan material, geometri TPMS, dan manufaktur aditif; (2) penggunaan nanofluida serta material perubahan fase (phase change material, PCM); dan (3) evaluasi termodinamika berbasis destruksi eksergi akibat beda temperatur serta kehilangan tekanan. Istilah "optimasi" digunakan untuk merujuk pada strategi yang telah dilaporkan oleh studi terdahulu. Tujuan artikel ini adalah merangkum manfaat dan keterbatasan setiap strategi, menunjukkan hubungan antarpilar, dan mengidentifikasi pertimbangan yang perlu diperiksa sebelum strategi tersebut diterapkan bersama pada sistem CHE.




**Gambar 1**: Kerangka konseptual yang menghubungkan batasan manufaktur dan geometri CHE, media termal, serta evaluasi eksergi (Sumber: disusun oleh penulis berdasarkan sintesis literatur, antara lain Careri dkk., 2023; Das dkk., 2024; Mirahmad dkk., 2025; Barz, 2021; Ashrafizadeh, 2019; Rauch dkk., 2022)

## 2. METODE

Kajian ini menggunakan pendekatan tinjauan pustaka terstruktur (structured literature review) dengan tahapan yang diadaptasi dari pedoman pelaporan PRISMA 2020 (Page dkk., 2021). Literatur yang relevan dikumpulkan, diseleksi, dinilai kualitas pelaporannya, lalu disintesis secara naratif untuk membandingkan strategi desain CHE. Prosedur dibagi menjadi empat tahap: pencarian pustaka, penerapan kriteria inklusi dan eksklusi, penilaian kualitas studi, serta ekstraksi dan sintesis hasil. Pendekatan ini digunakan untuk menyusun peta bukti dan kerangka konseptual; kajian tidak melakukan meta-analisis.

### *2.1 Strategi Pencarian Literatur*

Pengumpulan data sekunder dilakukan dengan menelusuri basis data akademis internasional bereputasi tinggi, dengan fokus utama pada perpustakaan digital ScienceDirect (Elsevier) yang menaungi jurnal-jurnal berdampak tinggi di bidang rekayasa termal (seperti Applied Thermal Engineering, Energy Conversion and Management, Cryogenics, dan Journal of Energy Storage). Untuk memperluas cakupan dan menjaring literatur akses terbuka (open access) terkini, penelusuran turut diperluas ke penerbit bereputasi lain seperti MDPI (Energies, Applied Sciences, Materials, Entropy, Machines, Micromachines, Inventions), ACS, ASME, serta repositori PubMed Central (PMC).

Pencarian literatur dilakukan menggunakan kombinasi kata kunci spesifik dan operator Boolean (AND/OR) untuk memastikan relevansi hasil. Tiga klaster kata kunci utama yang digunakan adalah: (a) Klaster Struktural (“Compact Heat Exchanger” OR “Microchannel Heat Exchanger”) AND (“Additive Manufacturing” OR “3D Printing” OR “Triply Periodic Minimal Surfaces” OR “TPMS”); (b) Klaster Media Termal (“Nanofluids” OR “Phase Change Materials” OR “PCM” OR “Thermal Battery”) AND (“Heat Transfer Enhancement”); dan (c) Klaster Evaluasi Termodinamika (“Exergy Analysis” OR “Exergy Destruction” OR “Second Law of Thermodynamics”) AND “High Temperature”.

### *2.2 Kriteria Inklusi dan Eksklusi*

Literatur dipertimbangkan untuk dimasukkan apabila relevan dengan desain CHE dan termasuk artikel penelitian atau tinjauan yang telah melalui telaah sejawat. Publikasi yang dipertimbangkan adalah yang terbit pada 2019–2026, khususnya yang melaporkan hasil eksperimen atau simulasi CFD/FEA pada penukar kalor bertemperatur tinggi atau bertekanan tinggi, pemulihan panas buang, dan aplikasi serupa. Kelayakan studi ditentukan dengan mempertimbangkan kesesuaian topik, metode, informasi kondisi operasi, serta ketersediaan parameter yang dapat dibandingkan.

Artikel dikeluarkan apabila tidak tersedia sebagai publikasi akademik lengkap, berfokus pada sistem tata udara domestik yang berada di luar cakupan kajian, atau hanya membahas kinerja berbasis Hukum Pertama tanpa informasi kehilangan tekanan maupun indikator terkait kualitas energi. Penerapan kriteria ini dimaksudkan untuk menjaga agar sintesis tetap berfokus pada kompromi termal-hidraulik dan evaluasi eksergi. Alasan dan jumlah artikel yang dikeluarkan pada tahap teks lengkap dirinci pada subbab 2.3 dan Gambar 2.

### *2.3 Seleksi Literatur*

Alur seleksi literatur ditampilkan pada Gambar 2. Penelusuran menghasilkan 160 rekaman dari ScienceDirect dan 50 rekaman dari sumber tambahan, sehingga terkumpul 210 rekaman. Pada penyaringan judul dan abstrak, 115 rekaman dikeluarkan karena tidak sesuai dengan ruang lingkup. Sebanyak 95 artikel menjalani pemeriksaan teks lengkap; 36 di antaranya dikeluarkan karena hanya menggunakan analisis Hukum Pertama tanpa metrik pendukung (13 artikel), membahas HVAC domestik (12 artikel), tidak melalui telaah sejawat (6 artikel), atau melaporkan data yang tidak lengkap (5 artikel). Sebanyak 59 publikasi kemudian dimasukkan dalam sintesis. Tidak ditemukan rekaman duplikat antarsumber, sehingga seluruh 210 rekaman masuk ke tahap penyaringan.

### *2.4 Penilaian Kualitas Studi*

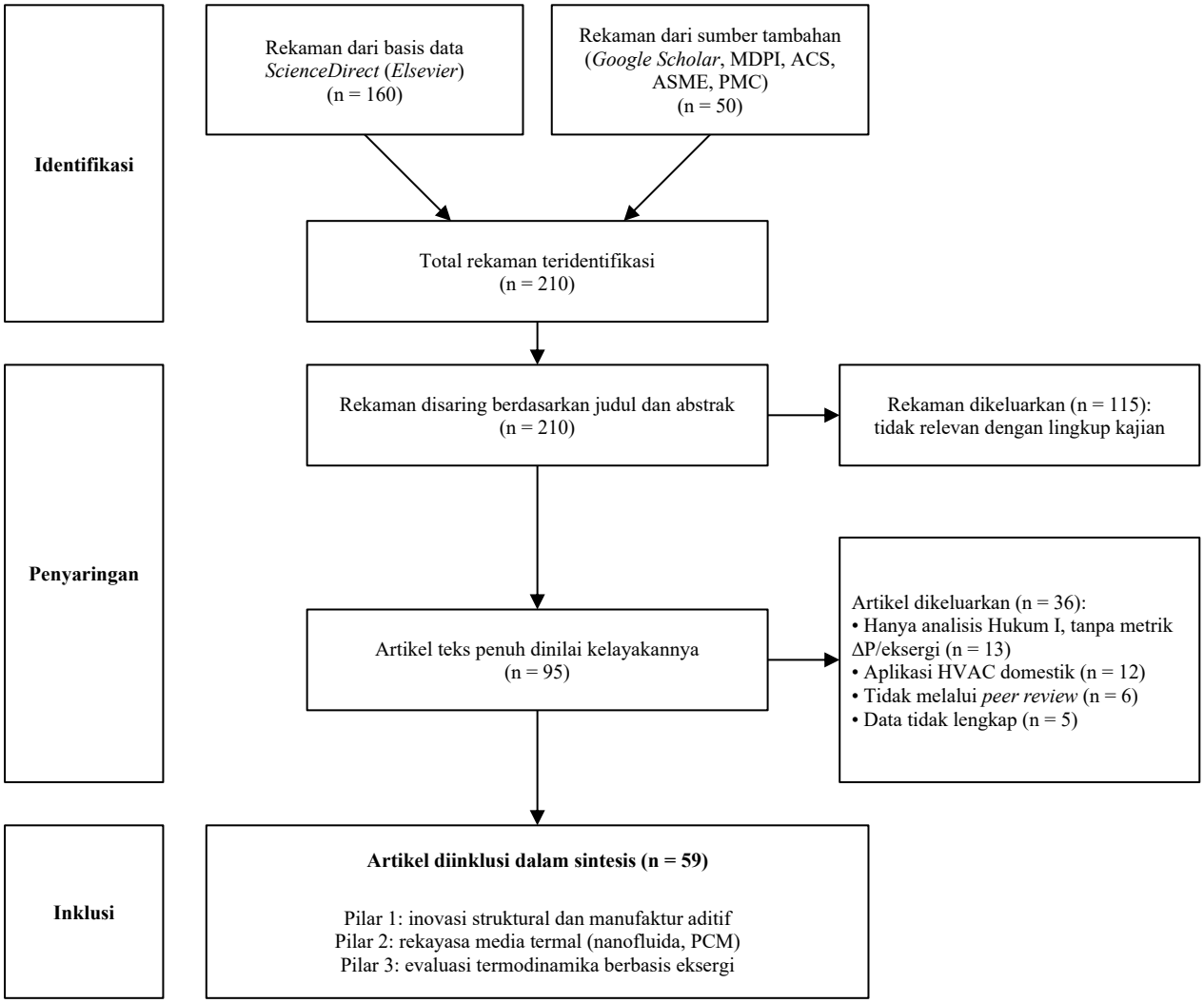
Status telaah sejawat saja tidak cukup untuk menggambarkan kualitas bukti. Oleh karena itu, setiap artikel penelitian yang diinklusi dinilai menggunakan daftar periksa lima kriteria yang diadaptasi dari prinsip penilaian kritis pada tinjauan sistematis, mengingat perangkat risk of bias yang baku untuk studi termal-hidraulik belum tersedia. Kriteria tersebut adalah (K1) kejelasan geometri, material, serta kondisi batas atau kondisi operasi; (K2) validasi, yaitu analisis ketidakpastian pengukuran pada studi eksperimental, atau uji independensi grid dan validasi terhadap data eksperimen maupun korelasi baku pada studi numerik; (K3) pelaporan metrik termal dan hidraulik secara bersamaan, misalnya angka Nusselt atau efektivitas bersama kerugian tekanan atau faktor friksi; (K4) keberadaan kasus acuan (baseline) sebagai pembanding; dan (K5) kelengkapan sifat termofisik fluida dan material. Setiap kriteria diberi skor 0 (tidak terpenuhi), 1 (terpenuhi sebagian), atau 2 (terpenuhi), sehingga skor maksimum adalah 10. Artikel dengan skor $\geq 7$ dikategorikan berkualitas tinggi, 4–6 sedang, dan $< 4$ rendah. Artikel tinjauan tidak diberi skor numerik dan hanya digunakan sebagai rujukan kontekstual, bukan sebagai bukti primer.

Hasil penilaian menunjukkan bahwa 38 artikel berkualitas tinggi, 8 sedang, dan 1 rendah, sedangkan 12 artikel merupakan tinjauan. Penilaian ini digunakan dalam sintesis dengan dua cara. Pertama, klaim kuantitatif dalam Tabel 1 dan pembahasan diutamakan berasal dari studi berkualitas tinggi. Kedua, temuan dari studi berkualitas sedang atau rendah, termasuk studi numerik tanpa validasi eksperimental, dilaporkan dengan bahasa yang lebih hati-hati dan tidak dijadikan dasar tunggal suatu kesimpulan.

### *2.5 Ekstraksi dan Sintesis Data*

Sebanyak 59 publikasi membentuk korpus utama tinjauan. Informasi yang diekstraksi meliputi metode penelitian, material dan geometri, fluida kerja, kondisi operasi, indikator perpindahan panas, kehilangan tekanan, serta temuan yang relevan. Data dikelompokkan menjadi tiga bagian: keterbatasan dan inovasi struktural; sifat media termal dan penyimpanan panas; serta evaluasi energi dan eksergi. Selain korpus utama, penulis menggunakan buku teks Shah dan Sekulić (2003), pedoman PRISMA 2020 (Page dkk., 2021), dan tinjauan Careri dkk. (2023) sebagai rujukan definisional atau kontekstual. Ketiga sumber tersebut tidak termasuk dalam 59 publikasi hasil seleksi dan tidak diberi skor kualitas.

Sintesis dilakukan dengan membandingkan manfaat dan konsekuensi setiap strategi. Sebagai contoh, peningkatan viskositas nanofluida dapat memperbesar kehilangan tekanan, sedangkan perubahan geometri TPMS memengaruhi struktur aliran dan perpindahan panas. Hubungan semacam ini dirangkum dalam kerangka konseptual pada Gambar 1. Kerangka tersebut menguraikan pertimbangan desain, tetapi belum menetapkan kombinasi geometri dan fluida yang paling baik secara universal.




**Gambar 2**: Alur seleksi literatur yang diadaptasi dari PRISMA 2020 (Page dkk., 2021)

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Literatur terpilih memperlihatkan bahwa pengembangan CHE melibatkan interaksi antara rancangan struktural, pemilihan fluida atau media penyimpan panas, dan evaluasi termodinamika. Ketiganya memengaruhi kinerja sistem secara bersamaan: peningkatan perpindahan panas dapat diikuti kebutuhan pemompaan yang lebih tinggi atau batasan fabrikasi yang lebih ketat. Tabel 1 merangkum sejumlah studi representatif beserta metode, komponen yang dikaji, dan temuan utamanya. Angka pada tabel dipertahankan sesuai kondisi penelitian asal dan tidak ditafsirkan sebagai perbandingan langsung antarperangkat.

**Tabel 1**: Ringkasan Metode, Objek, Dan Temuan Studi Representatif Pada Tiga Aspek Desain CHE

| Penulis & Tahun | Metode Riset | Fokus Kajian / Tipe Komponen | Temuan Kunci |
|---|---|---|---|
| (Pracht dkk., 2022) | Eksperimental & Numerik | Penukar kalor sirip kriogenik AlSi10Mg hasil cetak 3D (*refrigerator Brayton*) | Prototipe lolos uji tekanan hingga 46/60 bar tanpa kerusakan; model termal tervalidasi dengan pengukuran berbasis helium. |
| (Das dkk., 2024) | Desain, numerik, dan demonstrasi fabrikasi | Rekuperator *pin-fin* aliran berlawanan Haynes 282 hasil L-PBF untuk siklus $sCO_2$ | Dirancang untuk 800 °C dan tekanan sisi dingin 250 bar (beda tekanan 170 bar); biaya turun dari 80 menjadi 18 USD/kW-th seiring peningkatan skala. |
| (Liu dkk., 2024) | Eksperimental & Numerik | Matriks *Gyroid* paduan aluminium (20 kW) | Di atas konduktivitas material 100 W/m·K, kinerja matriks kurang sensitif terhadap variasi ketebalan dinding; hasil uji purwarupa sesuai dengan prediksi teoretis. |
| (Su dkk., 2025) | Eksperimental & Numerik | PCHE TPMS pada turbin gas mikro | Karakteristik persimpangan aliran turbulen meningkatkan angka *Nusselt* hingga 4,06 kali lipat dibandingkan dengan PCHE konvensional. |
| (Li dkk., 2025) | Numerik | TPMS *Fischer-Koch* S (FKS) vs. Diamond | Topologi FKS meningkatkan angka *Nusselt* 13,2–17,6% dibandingkan dengan *Diamond*, namun memicu kenaikan kehilangan tekanan 18,8–29,3%. |
| (Cabeza dkk., 2024) | Evaluasi kriteria multidimensi | PCM industri temperatur tinggi (400–600 °C) | Campuran eutektik NaCl-$Na_2CO_3$ berpotensi laten tinggi, namun higroskopis sehingga menuntut penanganan kelembapan rendah. |

| Penulis & Tahun | Metode Riset | Fokus Kajian / Tipe Komponen | Temuan Kunci |
|---|---|---|---|
| (Safarzadeh dkk., 2023) | Analisis 3E (*Energy, Exergy, Economic)* | Baterai termal hibrida (NePCM) | Pendispersian nanopartikel ke matriks PCM mengakselerasi transfer panas sekaligus menyeimbangkan efisiensi eksergetik dan keekonomian. |
| (Ajeeb & Murshed, 2022) | Tinjauan (data eksperimental) | Nanofluida $Al_2O_3$ pada penukar kalor pelat | Peningkatan konduktivitas termal disertai kenaikan viskositas dinamis hingga 7,5 % pada fraksi volume 0,2%. |
| (Assaf dkk., 2025) | Numerik (CFD) | Nanofluida hibrida ($Al_2O_3$-CuO/air) | Sinergi konduktivitas nanopartikel dengan turbulensi mekanis (twisted tape) menghasilkan TPF hingga 3,29. |
| (Cheng dkk., 2024) | Numerik (CFD, divalidasi dengan data literatur) | Tabung spiral dengan $sCO_2$ | Gaya apung dan aliran sekunder memengaruhi lapisan batas termal $sCO_2$; diusulkan korelasi angka *Nusselt* dengan galat < 20 %. |
| (Passoni dkk., 2024) | Eksperimental (visualisasi) | Pelat tipe *Chevron* (aliran dua-fasa) | Aliran dua fasa memicu transisi rezim yang menambah kompleksitas hambatan gesekan sehingga perlu dikuantifikasi dalam analisis destruksi eksergi. |
| (Yilmaz Aydin, 2025) | Eksperimental (termal & eksergetik) | HPHE dengan CMC/$Co_3O_4$ | Nanofluida $Co_3O_4$ berbasis CMC menaikkan efisiensi termal hingga 75,4–79,2 % dan menurunkan kehilangan eksergi (efisiensi penghematan eksergi hingga 33,6 %). |

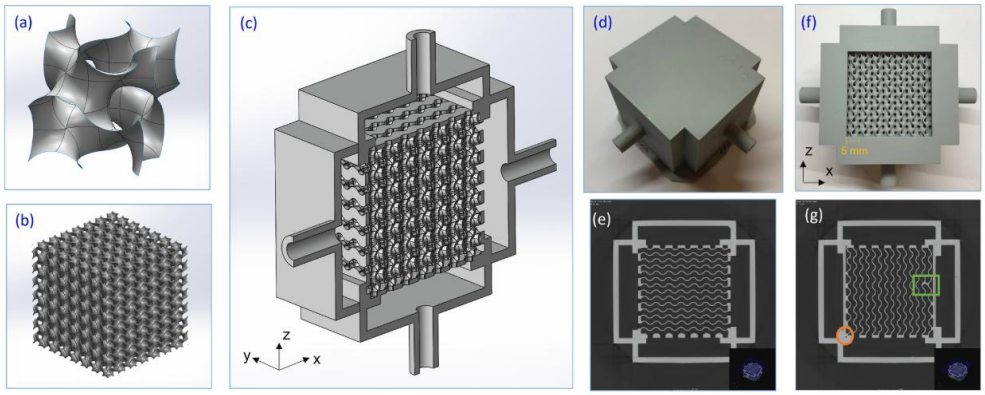
### *3.1 Batasan Struktural, Paduan Kinerja Tinggi, dan Manufaktur Aditif*

Metode perakitan tradisional pada CHE konvensional memiliki kelemahan inheren akibat perbedaan ekspansi termal antarkomponen pelat dan sirip. Fluktuasi suhu yang ekstrem sering kali memicu konsentrasi tegangan pada area sambungan; yang berujung pada retak lelah termal (thermal fatigue). Hasil ekstraksi data menunjukkan bahwa untuk aplikasi bertekanan dan bersuhu tinggi (HTHP) seperti pada siklus karbon dioksida superkritis ($sCO_2$) atau rekuperator gas buang industri, material baja tahan karat konvensional mulai digantikan oleh superalloy berbasis nikel seperti Haynes 230 atau Inconel yang semakin banyak digunakan (Patrao dkk., 2024). Material ini memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap fenomena rambat (creep) pada suhu tinggi dan terhadap lingkungan korosif. Untuk aplikasi suhu sangat rendah (kriogenik), paduan aluminium AlSi10Mg telah dicetak menjadi penukar panas sirip untuk refrigerator Brayton kompak dan diuji pada suhu kriogenik dengan helium (Funke dkk., 2022).

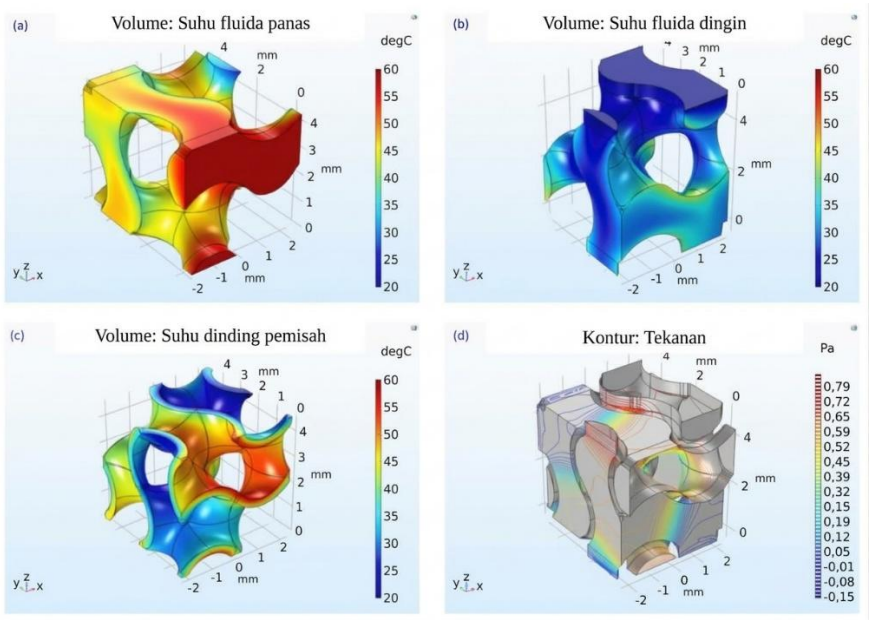
Transisi menuju Additive Manufacturing (AM) atau cetak 3D logam memungkinkan peleburan serbuk paduan lapis demi lapis untuk membentuk geometri internal berskala mikro. Karena proses ini mengurangi kebutuhan sambungan las dan brazing, CHE dapat dibuat sebagai satu kesatuan monolitik. Das dkk. (2024) merancang rekuperator pin-fin aliran berlawanan berbahan Haynes 282 melalui fusi serbuk laser (laser powder bed fusion/L-PBF) untuk siklus $sCO_2$ dengan suhu desain 800 °C, tekanan sisi dingin 250 bar, beda tekanan antarfluida 170 bar, dan umur desain 40.000 jam, serta mendemonstrasikan kemampuan cetak fitur-fitur rancangannya. Angka tersebut merupakan nilai desain. Bukti uji tekanan pada CHE hasil AM masih terbatas; Funke dkk. (2022) melaporkan prototipe penukar panas kriogenik berbahan AlSi10Mg hasil cetak 3D yang lolos uji tekanan hingga 46 bar dan 60 bar pada masing-masing sisinya tanpa kerusakan. Sebagai pembanding, CHE aliran silang yang kanalnya dibuat dengan frais lalu disambung difusi (diffusion bonding) telah diuji pada tekanan $sCO_2$ 9,5 MPa (Theologou dkk., 2021). Aspek manufakturabilitas CHE hasil AM dibahas tersendiri di akhir subbab ini.

Pada penukar panas kompak konvensional tipe sirip dan pipa (fin-and-tube), rekayasa geometri seperti penambahan vortex generator atau variasi jarak sirip telah lama diandalkan untuk mendongkrak efisiensi termal. Tinjauan terdahulu menunjukkan bahwa meskipun modifikasi pasif ini efektif memecah lapisan batas termal, pendekatannya secara inheren memicu eskalasi kerugian tekanan (pressure drop) yang membebani daya pompa; limitasi hidrodinamis inilah yang memaksa transisi perancangan menuju arsitektur yang lebih kompleks dan terintegrasi (Adam dkk., 2020). Selain pemilihan topologi, variabel desain seperti porositas, ketebalan dinding, dan ukuran sel turut menentukan keseimbangan antara efisiensi termal dan hambatan hidraulik. Untuk menekan tingginya kerugian tekanan tanpa penurunan performa perpindahan panas yang berarti, penerapan struktur porositas bergradasi (graded TPMS) di sepanjang arah aliran menjadi salah satu strategi optimasi desain yang direkomendasikan (Yeranee & Rao, 2022). Selain matriks TPMS cetak 3D, struktur busa logam (metal foam) berpori terbuka turut menawarkan alternatif permukaan yang diperluas. Studi eksperimental terbaru pada penukar panas busa aluminium sel-terbuka menunjukkan bahwa struktur berpori ini meningkatkan perpindahan panas konvektif dibandingkan tabung logam polos, sekaligus menyoroti bahwa kinerja keseluruhan pada akhirnya dibatasi oleh resistansi konvektif ke fluida sekunder (Fiedler dkk., 2024). Investigasi eksperimental pada penukar panas kompak air-udara berbasis busa aluminium menunjukkan bahwa peningkatan densitas pori (pores per inch/PPI) secara efektif mengintensifkan laju perpindahan panas, dengan matriks 20 PPI menghasilkan efektivitas termal hampir dua kali lipat dibandingkan dengan konfigurasi tanpa busa, meski harus dikompensasi dengan eskalasi faktor friksi pada laju aliran rendah (Oh dkk., 2025).

AM memfasilitasi pencetakan arsitektur Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS) seperti Gyroid dan Diamond (Dixit dkk., 2022) dan (Alteneiji dkk., 2022). Melalui optimasi desain berbasis TPMS, trade-off klasik antara peningkatan efisiensi termal dan kerugian tekanan dapat diperkecil, sehingga dihasilkan modul penukar panas yang lebih kompak dengan rasio luas permukaan terhadap volume yang tinggi dan kebutuhan daya pompa yang tetap rendah (Liu dkk., 2024a). Struktur Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS) menawarkan distribusi suhu yang lebih seragam dan perpindahan panas yang lebih baik dibandingkan dengan desain konvensional. Namun, tingginya kerugian tekanan hidraulik menuntut kompromi desain yang ketat. Optimasi parameter geometris seperti porositas, ukuran sel, dan ketebalan dinding diperlukan untuk menyeimbangkan performa termal dan efisiensi pemompaan (Amara & Saghir, 2025). Desain sel satuan (unit cell) yang menjadi basis arsitektur TPMS ini diilustrasikan pada Gambar 3, sedangkan visualisasi iso-permukaan termal hasil simulasi disajikan pada Gambar 4.




**Gambar 3:** Arsitektur penukar kalor kompak berbasis TPMS Gyroid, dari sel satuan hingga modul terakit: (a) sel satuan (*unit cell*), (b) matriks periodik tiga arah, (c) modul penukar kalor terintegrasi dengan *header* aliran silang, (d, f) purwarupa hasil manufaktur aditif logam dengan skala acuan, serta (e, g) tampang lintang saluran hasil pemindaian *micro-CT* dengan penanda area detail dan indikasi cacat internal (Dixit dkk., 2022)




**Gambar 4:** Visualisasi iso-permukaan termal hasil simulasi: (a) fluida panas, (b) fluida dingin, (c) dinding pemisah, dan (d) kontur tekanan. (Sumber: diadaptasi dari (Dixit dkk., 2022))

Pada studi eksperimen Su dkk. (2025), matriks TPMS berbahan baja tahan karat menunjukkan mekanisme pertemuan dan pemisahan aliran (merge–split) yang meningkatkan angka *Nusselt* hingga 4,06 kali dibandingkan PCHE konvensional pada kondisi yang diteliti. Peningkatan tersebut disertai konsekuensi kehilangan tekanan. Simulasi Zhang dan Yang (2025) menunjukkan perbedaan karakteristik antara topologi *Diamond*, *Gyroid*, dan *Primitive*, sehingga rancangan hibrida menjadi salah satu arah pengembangan. Studi Beer dan Rybár (2024) juga mengkaji kombinasi bentuk sheet dan skeletal gyroid. Perbedaan metode penelitian dan kondisi batas yang digunakan menyebabkan hasil antarstudi tidak dapat dibandingkan secara langsung untuk menetapkan keunggulan satu topologi pada seluruh kondisi aplikasi.

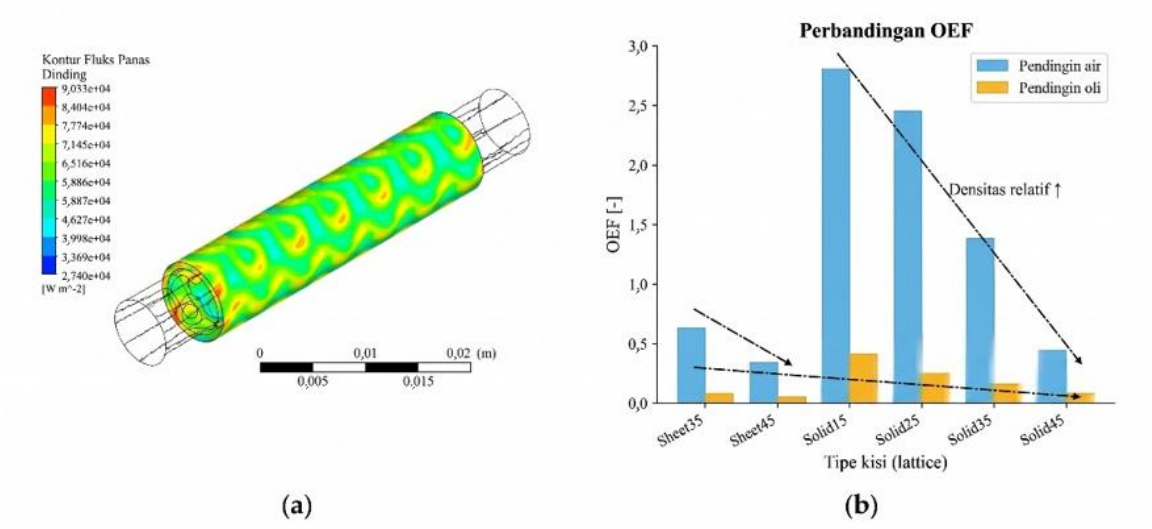
Pemodelan *Conjugate Heat Transfer* (CHT) tingkat lanjut menggunakan perangkat lunak seperti Ansys Fluent banyak digunakan untuk memetakan interaksi aliran dan termal pada arsitektur TPMS yang kompleks. Evaluasi terhadap berbagai parameter desain menunjukkan bahwa ketika konduktivitas termal material logam melampaui 100 W/m·K, kinerja matriks gyroid menjadi kurang sensitif terhadap variasi ketebalan dinding; temuan ini didukung oleh fabrikasi dan pengujian purwarupa penukar kalor aluminium berkapasitas 20 kW (Liu dkk., 2024b). Karakteristik ini memberi fleksibilitas desain yang lebih luas: paduan aluminium berpotensi menggantikan material yang lebih berat dan mahal, dan ketebalan dinding dapat disesuaikan untuk menekan $\Delta P$ tanpa penurunan kapasitas perpindahan panas yang berarti.

Pengembangan topologi kompleks berskala mikro ini menuntut pendefinisian matriks matematis yang presisi ke dalam model 3D menggunakan perangkat lunak *Computer Aided Design* (CAD) seperti *SolidWorks* atau *Autodesk Inventor*. Lengkungan kontinu TPMS dilaporkan dapat memecah lapisan batas termal dan meningkatkan turbulensi lokal. Pengaruh bentuk saluran terhadap kehilangan tekanan umumnya dikaji dengan penyelesaian persamaan Navier-Stokes menggunakan perangkat lunak *Computational Fluid Dynamics* (CFD) komersial seperti Ansys CFX. Dengan pendekatan ini, Inkoferer dkk. mengembangkan matriks sirip offset-strip hasil AM yang dilengkapi tepi berkontur dan bilah pengarah aliran (CLARE); pada aliran masuk miring, desain tersebut memungkinkan kecepatan masuk 2,7 kali lebih tinggi dengan kenaikan koefisien kehilangan tekanan hanya 5,3–12,2 % dibandingkan matriks yang sama pada aliran lurus, dan potensi perbaikan berikutnya terletak pada pengurangan separasi aliran di tepi depan sirip (Inkoferer dkk., 2026). Kajian terhadap performa termal juga menunjukkan bahwa struktur TPMS menawarkan perpindahan panas konveksi yang lebih tinggi dibandingkan dengan desain konvensional berkat luas permukaan spesifik yang besar dan arsitekturnya yang konstan memicu turbulensi (Saghir & Yahya, 2024).

Menurut hasil simulasi Li dkk. (2025), topologi *Fischer Koch* S (FKS) menghasilkan angka *Nusselt* sekitar 13,2–17,6 % lebih tinggi daripada *Diamond*, tetapi kehilangan tekanannya juga meningkat sekitar 18,8–29,3 %. Temuan tersebut menegaskan perlunya membandingkan peningkatan perpindahan panas dengan konsekuensi hidrauliknya pada rentang operasi yang sama. Pemilihan geometri tidak dapat didasarkan pada angka *Nusselt* saja.

Kerapatan luas permukaan yang tinggi pada TPMS dapat meningkatkan luas kontak termal, tetapi saluran yang berkelok juga memperbesar hambatan aliran. Sejumlah kajian numerik mengusulkan gradasi lokal ukuran sel dan bentuk saluran untuk mengendalikan stagnasi serta kehilangan tekanan (Oh dkk., 2023; Oh dkk., 2025). Pendekatan tersebut menjanjikan, namun keberhasilannya perlu dikonfirmasi melalui pengujian pada geometri hasil fabrikasi karena dimensi dan kekasaran aktual dapat berbeda dari model.

Validasi eksperimental terhadap matriks gyroid yang difabrikasi melalui peleburan serbuk berbasis laser mendukung temuan tersebut; analisis komparatif termal-hidraulik menunjukkan bahwa struktur kisi gyroid memberikan rasio luas permukaan terhadap volume yang tinggi sekaligus mendorong rezim turbulen pendingin (Dassi dkk., 2024). Hasil serupa dilaporkan dari pengujian termal pada *heat sink lattice* TPMS kompak hasil manufaktur aditif logam (Chouhan dkk., 2026), serta dari investigasi gabungan numerik dan eksperimental terhadap penukar kalor aliran silang berbasis tujuh varian sel satuan TPMS hasil cetak 3D yang memetakan *kompromi* antara kapasitas perpindahan panas dan kehilangan tekanan (Wang dkk., 2024). Dalam konteks sistem bertekanan ekstrem, optimasi konfigurasi kanal pada PCHE untuk siklus $CO_2$ menunjukkan bahwa penyeimbangan rasio resistansi termal antarfluida pada volume total tetap merupakan parameter penting agar perolehan termal tidak berkurang oleh penalti hidraulik (Zhou dkk., 2025). Perbandingan kinerja termal hidraulik antara matriks *gyroid* tipe *sheet* dan *solid* diilustrasikan pada Gambar 5.




**Gambar 5:** (a) Kontur fluks panas pada permukaan luar dan (b) perbandingan *overall enhancement factor* (OEF) untuk matriks *gyroid* tipe *sheet* dan *solid*. (Sumber: diadaptasi dari Dassi dkk. (2024))

Meskipun AM membuka kebebasan geometri, manufakturabilitas menentukan apakah rancangan TPMS dapat diterapkan pada skala industri. Pertama, kekasaran permukaan internal hasil fusi serbuk laser (L-PBF) relatif tinggi, terutama pada permukaan yang menghadap ke bawah (*down-skin*) dan permukaan miring, karena partikel serbuk menempel sebagian pada dinding. Kekasaran ini menaikkan kehilangan tekanan dan turbulensi; pada sebagian kasus perpindahan panas ikut meningkat, tetapi kehilangan tekanannya juga bertambah (Careri dkk., 2023). Kedua, toleransi dimensi dan ketebalan dinding minimum terbatas. Dinding yang lebih tipis dari sekitar 200–300 µm sulit dicetak tanpa cacat, ukuran fitur minimum yang dinyatakan produsen mesin berkisar 100–300 µm, dan galat dimensi cenderung meningkat seiring menipisnya fitur (Careri dkk., 2023). Dixit dkk. (2022) melaporkan dinding *gyroid* setebal 300 µm yang kedap bocor, tetapi hasil pemindaian micro-CT pada Gambar 3 juga memperlihatkan indikasi cacat internal.

Ketiga, porositas, *lack of fusion*, dan *keyhole* merupakan cacat L-PBF yang paling umum. Pori dan rongga dapat menjadi titik lemah tempat fluida bocor antaraliran, sementara kajian sistematis mengenai kebocoran CHE hasil AM masih jarang (Careri dkk., 2023). Keempat, pembuangan serbuk (*depowdering*) dari kanal internal sulit dilakukan karena banyak penukar kalor berbasis kisi atau hasil optimasi topologi tidak memiliki bukaan. Strategi yang dilaporkan meliputi penambahan lubang bantu yang kemudian ditutup dengan las laser, pembersihan ultrasonik, dan penggunaan stasiun *depowdering* komersial (Careri dkk., 2023). Kelima, pascaproses seperti perlakuan panas pelepasan tegangan, *hot isostatic pressing* (HIP) untuk mengurangi porositas dan memperbaiki umur lelah, serta pelapisan anti-korosi menambah tahapan dan biaya produksi; perlakuan panas standar bahkan dapat menurunkan kekuatan paduan aluminium hasil L-PBF (Careri dkk., 2023). Terakhir, harga serbuk paduan nikel sekitar sepuluh kali lipat harga serbuk aluminium atau baja tahan karat (Careri dkk., 2023). Analisis tekno-ekonomi oleh Das dkk. (2024) menunjukkan bahwa biaya rekuperator AM turun dari sekitar 80 menjadi 18 USD/kW-th seiring peningkatan ukuran dan kapasitas termal, sehingga aspek ekonomi AM sangat bergantung pada skala produksi. Ringkasan tantangan tersebut disajikan pada Tabel 2.

**Tabel 2**: Tantangan Manufakturabilitas CHE Berbasis Manufaktur Aditif Dan Strategi Mitigasinya

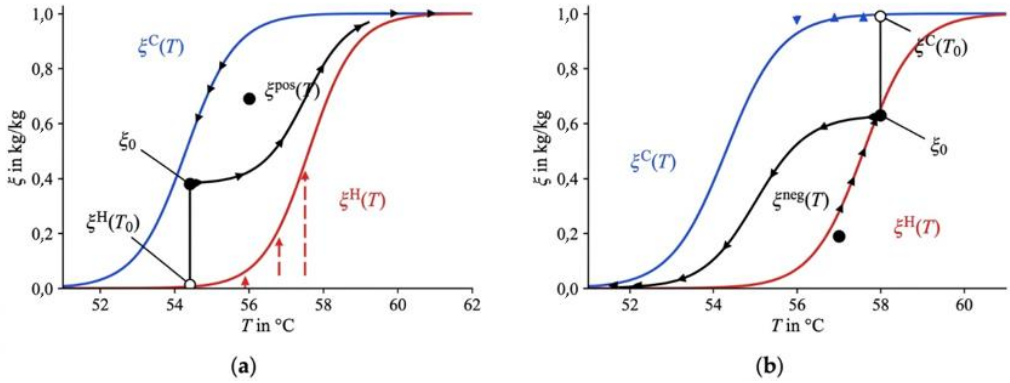
| Aspek | Tantangan utama | Dampak pada kinerja CHE | Mitigasi yang dilaporkan |
|---|---|---|---|
| Kekasaran permukaan | Kekasaran internal tinggi, terutama pada permukaan *down-skin* dan miring, akibat serbuk yang menempel sebagian | ΔP meningkat; perpindahan panas dapat ikut meningkat | Pengaturan orientasi dan sudut kemiringan cetak; memasukkan pengaruh kekasaran ke dalam model desain |
| Toleransi dimensi dan dinding tipis | Dinding < ~200–300 µm sulit dicetak tanpa cacat; fitur minimum mesin 100–300 µm; galat dimensi naik pada fitur tipis | Membatasi ukuran sel TPMS dan $D_h$ minimum; geometri aktual menyimpang dari model CAD | Rancangan di atas batas kemampuan mesin; verifikasi geometri dengan micro-CT |
| Cacat internal | Porositas, *lack of fusion*, *keyhole*, dan retak | Risiko kebocoran antaraliran serta penurunan kekuatan dan umur lelah pada kondisi HTHP | Optimasi parameter proses, HIP, uji kebocoran dan tekanan, inspeksi *micro-CT* |
| Pembuangan serbuk | Kanal internal berbasis kisi atau hasil optimasi sering tidak memiliki bukaan | Penyumbatan kanal, distribusi aliran tidak merata, kontaminasi fluida kerja | Lubang bantu yang kemudian dilas, pembersihan ultrasonik, stasiun *depowdering* |
| Pascaproses | Perlakuan panas pelepasan tegangan, HIP, pelapisan anti-korosi | Menambah tahapan dan biaya; perlakuan standar dapat menurunkan kekuatan paduan Al hasil L-PBF | Pemilihan perlakuan sesuai paduan dan kondisi operasi |
| Biaya | Serbuk paduan nikel ~10 kali lebih mahal daripada serbuk Al atau baja tahan karat; waktu cetak panjang | Biaya per kW tinggi pada skala kecil | Peningkatan ukuran dan kapasitas termal, header yang ringkas, pemilihan mesin AM |

Sumber: Careri dkk. (2023), Dixit dkk. (2022), dan Das dkk. (2024)

### *3.2 Rekayasa Media Termal: Nanofluida dan Material Perubahan Fase*

Manfaat inovasi struktur perlu dipertimbangkan bersama sifat media termal yang melewati saluran atau menyimpan panas. Untuk aplikasi industri pada kisaran 400–600 °C, pemilihan PCM tidak cukup hanya berdasarkan temperatur leleh dan entalpi peleburan. Faktor higroskopisitas, korosi terhadap wadah, kestabilan termal, serta keselamatan penanganan juga relevan; Cabeza dkk. (2024) membahas pendekatan seleksi multikriteria dan potensi garam eutektik NaCl–$Na_2CO_3$. Pada temperatur yang lebih tinggi, paduan logam juga diteliti sebagai kandidat penyimpanan panas laten. Kelayakannya tetap memerlukan pengukuran sifat termofisik dan pengujian siklus. Nanofluida merupakan pendekatan berbeda, yaitu modifikasi sifat fluida pembawa panas. Potensi peningkatan konduktivitasnya harus diimbangi dengan evaluasi viskositas, stabilitas dispersi, dan penurunan kapasitas panas spesifik yang mungkin terjadi (Mirahmad dkk., 2025).

Konduktivitas termal fluida dasar yang terbatas mendorong pengembangan nanofluida melalui penambahan partikel seperti $Al_2O_3$ atau CuO. Ajeeb dan Murshed (2022) melaporkan bahwa peningkatan sifat perpindahan panas dapat disertai kenaikan viskositas; salah satu hasil yang dikutip menunjukkan kenaikan viskositas dinamis hingga 7,5 % pada fraksi volume partikel 0,2 %. Oleh sebab itu, konsentrasi nanopartikel tidak seharusnya dipilih berdasarkan konduktivitas saja. Penilaian menyeluruh perlu memasukkan kehilangan tekanan dan daya pemompaan. Hasil penelitian pada penukar kalor mikro berbasis nanofluida $TiO_2$-air juga menunjukkan bahwa respons termal dan hidraulik bergantung pada temperatur serta kondisi aliran (Mokrane & Bourouis, 2024).




Gambar 6: Histeresis termal PCM pada proses pemanasan dan pendinginan (diadaptasi dari Barz, 2021).

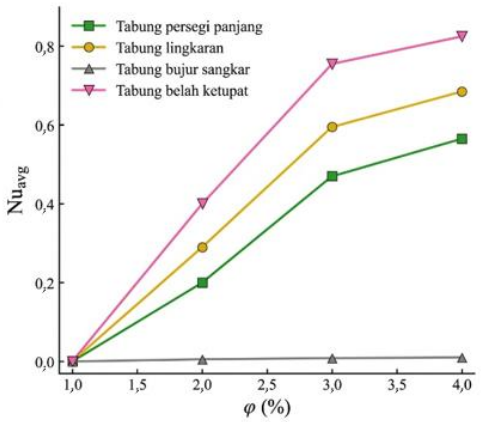
Pasokan panas buang industri dapat berubah seiring fluktuasi operasi proses. Integrasi PCM pada penukar kalor menjadi salah satu pilihan untuk menyerap kelebihan panas saat beban meningkat dan melepaskannya kembali saat pasokan menurun. Pada penukar kalor sirip-pelat, Barz dan Emhofer (2021) mengkaji transisi fase parafin, sementara Barz (2021) menunjukkan perlunya memperhitungkan histeresis antara jalur pemanasan dan pendinginan. Perbedaan jalur tersebut memengaruhi prediksi pelelehan serta pembekuan dan diilustrasikan pada Gambar 6.

Model transien diperlukan untuk menggambarkan perubahan entalpi dan kapasitas panas semu PCM selama siklus termal. Pengembangan nanoparticle-enriched phase change material (NePCM) bertujuan meningkatkan laju perpindahan panas dalam media penyimpan laten. Safarzadeh dkk. (2023) menilai pendekatan ini dari sisi energi, eksergi, dan ekonomi. Namun, penambahan partikel juga membawa persoalan kestabilan dan karakterisasi sifat termofisik setelah siklus berulang. Karena itu, keuntungan jangka pendek tidak cukup untuk memastikan keandalan operasi jangka panjang.

Nanofluida hibrida menggabungkan dua jenis nanopartikel untuk memodifikasi respons termal fluida. Wciślik dan Taler (2024) mengevaluasi nanofluida berbasis $TiO_2$-$SiO_2$ dalam etilen glikol menggunakan pendekatan eksergi dan ekonomi. Assaf dkk. (2025) melaporkan faktor kinerja termal hingga 3,29 pada simulasi aliran turbulen dengan nanofluida $Al_2O_3$-CuO/air yang dipadukan dengan sisipan pengganggu aliran. Nilai tersebut berlaku pada rancangan dan kondisi studi terkait; penggunaan nanofluida hibrida tidak dengan sendirinya menjamin peningkatan kinerja bersih.

Meskipun demikian, keunggulan nanofluida hibrida tidak bersifat universal dan sangat bergantung pada rezim aliran serta kondisi operasi. Studi eksperimental pada penukar kalor pelat kompak dengan nanofluida hibrida $Fe_3O_4$ Cu/air pada rezim laminar ($172 \leq Re \leq 400$) menunjukkan bahwa, walaupun efektivitas penukar kalor meningkat hingga 20 %, angka *Nusselt* dan koefisien konveksi justru menurun akibat kenaikan viskositas yang menebalkan lapisan batas termal pada saluran berdiameter hidraulik kecil; lebih jauh, penerapan medan magnet eksternal (0,46 T) menekan kinerja konvektif hingga 6–8 % karena gaya Lorentz memicu aglomerasi dan retensi nanopartikel (Tekir, 2025). Studi numerik pada penukar kalor dengan tabung berputar memperkuat dualitas ini: nanofluida Cu-air memberikan perolehan termal terbaik dan rotasi tabung meningkatkan perpindahan panas secara nyata, namun kedua mekanisme tersebut sekaligus menaikkan kehilangan tekanan dan faktor friksi (Mohamed dkk., 2024). Tinjauan mutakhir bahkan menegaskan bahwa keunggulan nanofluida tidak dapat direduksi semata-mata pada peningkatan konduktivitas termal, melainkan harus dievaluasi terhadap stabilitas dispersi, modifikasi permukaan, dan keberlanjutan operasional jangka panjang (Aksoy, 2025). Perspektif ini dikuatkan oleh tinjauan yang menyoroti bahwa penambahan nanopartikel, meski meningkatkan konduktivitas termal, dapat menurunkan kapasitas panas spesifik fluida dasar, sehingga optimasi formulasi harus menyeimbangkan kedua sifat ini tanpa menyebabkan peningkatan viskositas agar potensinya bagi sistem penyimpanan dan konversi energi dapat terealisasi (Mirahmad dkk., 2025).

Investigasi eksperimental menunjukkan bahwa formulasi rasio nanopartikel dan perlakuan ultrasonikasi yang tepat tidak hanya meningkatkan koefisien perpindahan panas konvektif, tetapi juga menstabilkan dispersi partikel guna mencegah aglomerasi dan penyumbatan pada saluran mikro (Wu dkk., 2026). Selain nanofluida dan PCM, pemanfaatan fluida kerja superkritis seperti $sCO_2$ juga banyak dikaji; sifat termofisik $sCO_2$ yang berubah tajam di dekat titik kritis memengaruhi koefisien perpindahan panas konvektif secara kuat, antara lain melalui gaya apung dan aliran sekunder pada tabung spiral (Cheng dkk., 2024). Selain penambahan nanofluida, rendahnya konduktivitas termal PCM juga diatasi dengan menyisipkan sirip (fins) logam berkonduktivitas tinggi. Peningkatan panjang dan jumlah sirip dilaporkan lebih efektif dalam mempercepat siklus termal (charge/discharge) dibandingkan dengan penambahan ketebalan sirip. Namun, keberadaan sirip ini memicu dilema karena menghambat arus konveksi alami yang penting untuk proses peleburan. Untuk mengatasi kompromi ini, tren desain kini beralih dari sirip planar sederhana menuju arsitektur bercabang yang kompleks (seperti bentuk Y atau snowflake) guna memperpendek jalur konduksi tanpa mematikan sirkulasi termal secara keseluruhan (Ye dkk., 2023). Studi numerik pada penukar kalor tabung-selongsong dengan nanofluida hibrida $Al_2O_3$-MWCNT menunjukkan bahwa peningkatan fraksi volume nanopartikel dapat mendorong laju perpindahan panas hingga lebih dari 100 % pada geometri tabung tertentu sekaligus mempertahankan generasi entropi pada level minimal (Bouselsal dkk., 2023), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7.

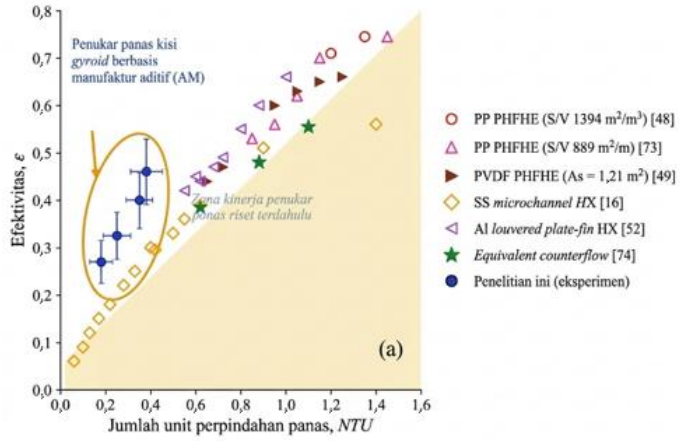



**Gambar 7:** Peningkatan angka *Nusselt* rata-rata ($Nu_{av9}$) seiring kenaikan fraksi volume nanofluida hibrida $Al_2O_3$-MWCNT/air pada berbagai bentuk tabung. (Sumber: diadaptasi dari Bouselsal dkk. (2023))

Interaksi antara geometri kompleks dan media termal mulai dievaluasi secara terpadu. Kilic (2025), misalnya, meneliti penggunaan nanofluida pada penukar kalor berbasis TPMS, sedangkan Khouri dkk. (2024) membahas nanofluida oksida grafena untuk aplikasi industri. Temuan-temuan tersebut menunjukkan potensi intensifikasi perpindahan panas, tetapi efektivitasnya bergantung pada konsentrasi partikel, bentuk saluran, serta kondisi aliran. Louis dkk. (2022) menekankan perlunya menyeimbangkan peningkatan koefisien perpindahan panas dengan kehilangan tekanan. Dengan demikian, kombinasi material, geometri, dan fluida perlu dinilai sebagai suatu sistem.

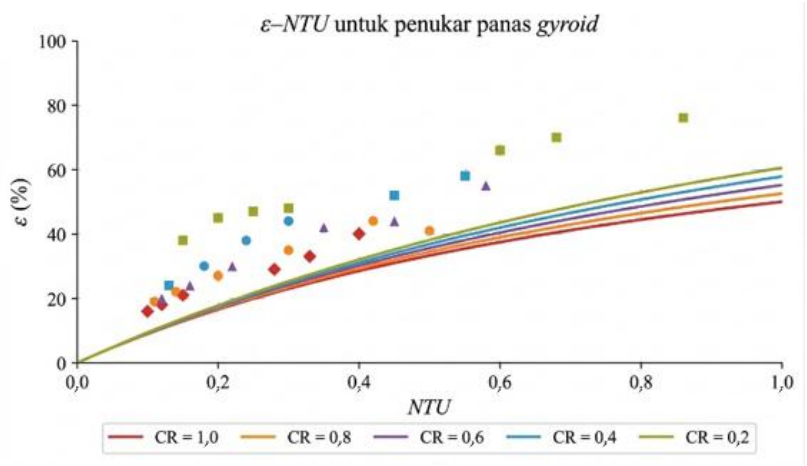
### *3.3 Integrasi Sistem dan Evaluasi Berbasis Eksergi*

Penggunaan paduan tahan temperatur tinggi, geometri TPMS, dan media termal adaptif membuka peluang peningkatan kinerja CHE. Akan tetapi, strategi terbaik berbeda menurut tujuan dan batasan sistem. Ahmad dkk. (2022) melaporkan optimasi penukar kalor kompak sirip-pelat untuk pemulihan energi dengan mempertimbangkan aspek termal, hidraulik, eksergi, dan ekonomi. Pereira dkk. (2023) meninjau potensi nanofluida pada pemulihan panas buang, sedangkan Ding dkk. (2024) membahas peran penukar kalor pipa panas untuk berbagai rentang temperatur operasi. Perbandingan efektivitas dan jumlah unit perpindahan panas (*number of transfer units*, NTU) dari beberapa rancangan ditampilkan pada Gambar 8 dan 9. Angka dari kondisi penelitian yang berlainan tidak dapat ditafsirkan sebagai perbandingan langsung.




**Gambar 8:** Perbandingan efektivitas termal penukar kalor matriks *Gyroid* cetak 3D terhadap berbagai desain penukar kalor konvensional dan mikro-saluran lainnya. (Sumber: diadaptasi dari Dixit dkk. (2022))

Untuk menempatkan keunggulan arsitektur TPMS dalam lanskap teknologi penukar kalor kompak, Gambar 8 memetakan efektivitas termal (ε) terhadap jumlah unit perpindahan panas (NTU) dari berbagai desain mutakhir, mulai dari penukar kalor serat berongga polimer (PHFHE), mikrokanal baja tahan karat, hingga pelat-sirip beralur aluminium. Seluruh desain terdahulu membentuk sebuah pita kinerja (extant work performance zone) dengan tren yang konsisten: efektivitas hanya meningkat dengan mengorbankan penambahan NTU, yang berarti perluasan luas permukaan atau volume matriks. Sebaliknya, data eksperimental matriks gyroid hasil manufaktur aditif justru menempati kuadran kiri atas diagram, yakni mencapai efektivitas setara dengan desain konvensional (ε ≈ 0,27–0,46), namun pada NTU yang jauh lebih rendah (≈ 0,18–0,40). Pergeseran posisi ini menunjukkan bahwa, pada data yang dibandingkan, arsitektur TPMS dapat menggeser kompromi klasik antara efektivitas dan ukuran sehingga efektivitas target dapat dicapai dengan matriks yang lebih ringkas. Perbandingan ini perlu dibaca dengan hati-hati karena data berasal dari kondisi uji, fluida, dan material yang berbeda (Dixit dkk., 2022).




**Gambar 9:** Hubungan efektivitas (ε) dan NTU pada struktur Gyroid (diadaptasi dari Alteneiji dkk., 2022).

Karakteristik intrinsik penukar kalor gyroid dipetakan melalui hubungan efektivitas termal (ε) dan jumlah unit perpindahan panas (NTU) pada Gambar 9, yang menampilkan lima kurva teoretis pada rasio kapasitas panas (capacity ratio/CR) berbeda, dari CR = 1,0 hingga CR = 0,2, beserta titik hasil simulasi CFD. Untuk setiap CR, efektivitas meningkat namun melandai seiring bertambahnya NTU, dan pada NTU yang sama, efektivitas tertinggi dicapai oleh CR terkecil, sesuai prinsip bahwa ketidakseimbangan laju kapasitas antarfluida menguntungkan kinerja termal. Aspek terpenting adalah bahwa titik hasil simulasi matriks gyroid konsisten berada di atas kurva analitis penukar kalor aliran silang (crossflow), yang menandakan bahwa percampuran aliran sekunder akibat lengkungan permukaan kontinu TPMS meningkatkan koefisien perpindahan panas efektif sehingga efektivitas hasil simulasi melampaui prediksi model analitis. Hasil ini belum divalidasi secara eksperimental, dan Alteneiji dkk. (2022) sendiri menyatakan bahwa pengujian eksperimen masih diperlukan. Jika terkonfirmasi, penukar kalor gyroid mampu mencapai target efektivitas pada NTU yang lebih rendah, yang berarti kebutuhan luas permukaan dan volume matriks yang lebih ringkas (Alteneiji dkk., 2022).

Sebagai dasar komparasi, evaluasi termodinamika pada penukar kalor konvensional seperti shell-and-tube menunjukkan bahwa analisis Hukum Pertama (energi) saja tidak cukup untuk memetakan lokasi kerugian sistem yang sesungguhnya; analisis eksergi menunjukkan bahwa destruksi eksergi terbesar terakumulasi pada area dengan gradien temperatur ekstrem antarfluida (Alamu dkk., 2023). Oleh karena itu, untuk desain CHE yang beroperasi pada kondisi ekstrem, evaluasi berbasis Hukum Pertama perlu dilengkapi dengan Hukum Kedua Termodinamika (analisis eksergi). Generasi entropi akibat gradien temperatur yang curam dan gesekan viskos menurunkan kualitas energi yang sebenarnya dapat dikonversi menjadi kerja mekanis, sehingga optimasi berbasis Hukum Kedua mencari titik kompromi yang meminimalkan total destruksi eksergi, alih-alih hanya memaksimalkan laju perpindahan panas (Ashrafizadeh, 2019; Rauch dkk., 2022). Selain itu, konfigurasi *Heat Pipe Heat Exchanger* (HPHE) menawarkan alternatif struktur kompak yang menjanjikan untuk

pemulihan limbah panas berkat kemampuannya memisahkan aliran fluida panas dan dingin secara fisik serta operasinya yang mendekati isotermal (Ding dkk., 2024).

Dalam saluran mikro CHE, destruksi eksergi (Ed) didorong oleh dua mekanisme fisik yang saling bertentangan. Pertama, perpindahan panas melintasi perbedaan temperatur yang terlalu curam menghasilkan generasi entropi termal yang tinggi (Ed,ΔT). Kedua, upaya meningkatkan turbulensi melalui penyempitan saluran justru memicu disipasi viskositas fluida yang bermanifestasi sebagai kehilangan tekanan yang besar (Ed,ΔP) (Das dkk., 2024; Safikhani dkk., 2024). Manfaat pendekatan multi-objektif ditunjukkan oleh studi optimasi penukar kalor shell-and-tube yang memadukan analisis komponen utama (PCA), *Response Surface Methodology* (RSM), jaringan saraf tiruan, dan algoritma genetika; kerangka terpadu ini memetakan solusi front Pareto yang menyeimbangkan efektivitas, resistansi termal, dan koefisien perpindahan panas keseluruhan sekaligus mengidentifikasi laju aliran massa dan temperatur masuk sebagai parameter paling berpengaruh (Venkatesh dkk., 2024). Investigasi eksperimental pada pelat tipe *Chevron* menunjukkan bahwa interaksi aliran dua fasa memicu transisi rezim yang meningkatkan kompleksitas dan fluktuasi kehilangan tekanan, sehingga kuantifikasinya menjadi parameter penting dalam analisis destruksi eksergi (Passoni dkk., 2024). Formulasi matematis destruksi eksergi pada berbagai tipe penukar kalor menunjukkan bahwa kerugian ini bergantung kuat pada rasio kapasitas panas dan gradien temperatur masuk (Rauch dkk., 2022).

Hubungan antara destruksi eksergi dan generasi entropi dapat dijelaskan melalui teorema *Gouy-Stodola*. Pada penukar kalor, kedua sumber irreversibilitas utama berasal dari perpindahan panas akibat beda temperatur berhingga dan gesekan aliran. Hubungan totalnya dinyatakan dalam Persamaan (1) (Ashrafizadeh, 2019; Rauch dkk., 2022).

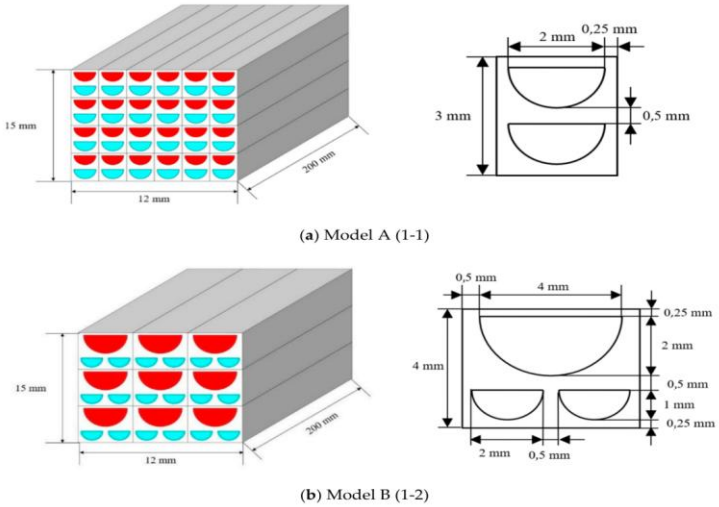
$$\dot{E}_d = T_0 \dot{S}_{gen} = T_0\left(\dot{S}_{gen,\Delta T} + \dot{S}_{gen,\Delta P}\right) \quad (1)$$

dengan $T_0$ adalah temperatur lingkungan acuan (K), sedangkan $\dot{S}_{gen,\Delta T}$ dan $\dot{S}_{gen,\Delta P}$ berturut-turut adalah laju generasi entropi akibat beda temperatur dan akibat kehilangan tekanan (W/K). Pada tingkat lokal, laju generasi entropi volumetrik untuk aliran fluida Newtonian dinyatakan dalam bentuk umum berikut, yang dalam koordinat Kartesius digunakan antara lain oleh Bouselsal dkk. (2023):

$$\dot{S}'''_{gen} = \frac{k(\nabla T)^2}{T^2} + \frac{\mu \Phi}{T} \quad (2)$$

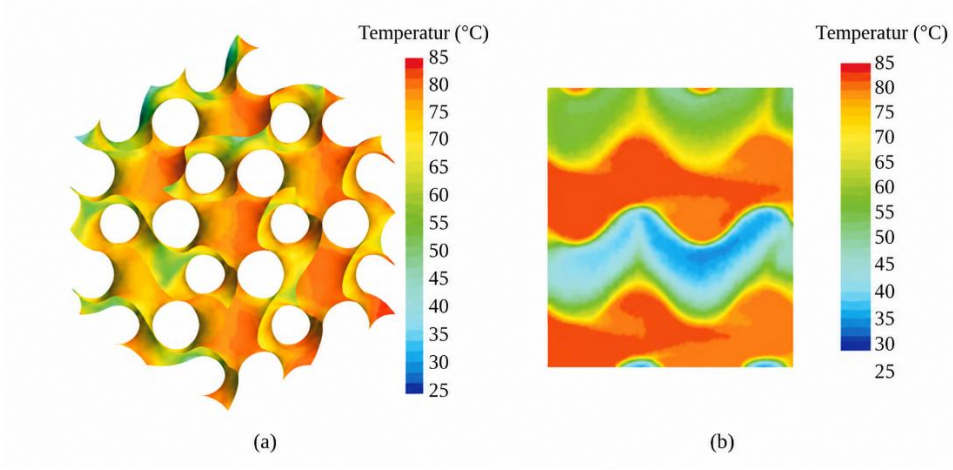
Dalam Persamaan (2), k adalah konduktivitas termal fluida, T menyatakan temperatur absolut lokal, μ adalah viskositas dinamis, dan Φ merupakan fungsi disipasi viskos. Suku yang berkaitan dengan gradien temperatur menggambarkan generasi entropi termal, sedangkan suku disipasi menggambarkan kontribusi gesekan aliran. Proporsi kedua kontribusi dapat dievaluasi menggunakan bilangan Bejan, Be = Ṡgen,ΔT/Ṡgen,total. Dengan demikian, peningkatan perpindahan panas melalui penyempitan kanal atau penambahan nanopartikel tidak otomatis mengurangi destruksi eksergi total karena perubahan sifat aliran dapat memperbesar kontribusi gesekan.

Dinamika destruksi eksergi menjadi semakin kompleks pada arsitektur tingkat lanjut, seperti saluran mikro bergelombang (*wavy microchannels*) yang dipadukan dengan *nanofluida*. Manipulasi orientasi kelengkungan saluran dilaporkan memecah lapisan batas termal dan menginduksi pusaran sekunder (*secondary vortices*); pemodelan campuran multifasa pada dua orientasi saluran bergelombang menunjukkan bahwa orientasi kiri–kanan menghasilkan destruksi eksergi total sekitar 20 % lebih rendah, penambahan nanofluida menurunkan destruksi eksergi, sedangkan kenaikan daya pemompaan menurunkan bilangan efektivitas (Jamshidmofid dkk., 2023). Evaluasi termodinamika berbasis Hukum Kedua juga penting pada fluida kerja tingkat lanjut seperti nanofluida hibrida *non-Newtonian*: investigasi eksperimental pada *heat pipe heat exchanger* menunjukkan bahwa nanofluida $Co_3O_4$ berbasis CMC menaikkan efisiensi termal hingga 75,4-79,2 % dan menurunkan kehilangan eksergi, dengan efisiensi penghematan eksergi hingga 33,6 % (Yilmaz Aydin, 2025). Konfigurasi kanal PCHE untuk siklus $sCO_2$ *Brayton* yang menyeimbangkan rasio resistansi termal antarfluida diilustrasikan pada Gambar 10.




**Gambar 10:** Konfigurasi kanal *Printed Circuit Heat Exchanger* (PCHE) untuk siklus $sCO_2$ Brayton: (a) kanal berukuran identik (1-1) dan (b) kanal berukuran hibrida (1-2). (Sumber: diadaptasi dari Zhou dkk. (2025))

Literatur mengarah pada pentingnya evaluasi multiobjektif dalam desain CHE. Simulasi CFD dan analisis energi–eksergi dapat digunakan untuk membandingkan perolehan termal, kehilangan tekanan, serta keterbatasan material dan manufaktur. Safikhani dkk. (2024) menunjukkan penerapan pendekatan ini pada konfigurasi silinder panas berputar, sedangkan Łach (2026) mengulas pengembangan metode komputasi untuk analisis entropi. Integrasi model fisik dengan metode berbantuan data dapat membantu penyaringan alternatif desain, tetapi akurasi keputusan tetap bergantung pada validasi model dan mutu data. Gambar 11 menampilkan contoh kontur temperatur pada struktur Gyroid yang relevan untuk menilai distribusi termal.




Gambar 11: Kontur temperatur hasil simulasi pada (a) antarmuka dan (b) penampang struktur Gyroid (diadaptasi dari Alteneiji dkk., 2022).

Gambar 11 memperlihatkan distribusi temperatur pada antarmuka dan penampang struktur Gyroid berdasarkan simulasi yang dikutip dari Alteneiji dkk. (2022). Kontur temperatur tersebut membantu menjelaskan bagaimana geometri memengaruhi distribusi panas, tetapi gambar saja tidak cukup untuk menentukan nilai destruksi eksergi. Penilaian kuantitatif tetap memerlukan gradien temperatur, sifat termofisik, medan kecepatan, serta kontribusi disipasi viskos dalam Persamaan (2). Karena itu, klaim mengenai penurunan irreversibilitas harus didasarkan pada perhitungan yang memenuhi kondisi batas studi.

Penerapan Hukum Kedua Termodinamika sebagai kerangka evaluasi telah banyak diadopsi dalam perancangan penukar kalor modern. Kajian terdahulu menunjukkan bahwa minimalisasi generasi entropi (atau kerugian eksergi) dapat dijadikan fungsi objektif perancangan, meskipun titik optimum sesungguhnya bergantung pada klasifikasi penukar kalor dan kendala operasionalnya (Ashrafizadeh, 2019). Pada skala mini/mikro, analisis Hukum Kedua terhadap penukar kalor pelat paralel aliran berlawanan menunjukkan bahwa konduksi dinding multidimensi dan ketebalan dinding tak berdimensi berpengaruh besar terhadap laju produksi entropi (Ibáñez dkk., 2025). Pada penukar kalor pelat berbasis nanofluida, evaluasi efisiensi eksergetik menunjukkan bahwa pemilihan angka korelasi Nusselt memengaruhi hasil akhir efisiensi eksergi (Wciślik & Taler, 2024). Penyeimbangan antara intensifikasi perpindahan panas dan penalti hidraulik juga tampak pada uji eksperimental nanofluida hBN–air yang mengukur kenaikan angka *Nusselt* bersama kehilangan tekanannya (Ziyadanogullari & Percin, 2024). Pada penukar kalor penyimpan termal berbasis PCM, keseimbangan serupa muncul antara konduktivitas dan skala panjang: memperkecil ketebalan lapisan PCM dari skala tangki ke skala penukar kalor kompak memangkas waktu peleburan dari sekitar 5.500 s menjadi 460 s tanpa peningkatan konduktivitas termal (Messenger dkk., 2024).

### *3.4 Kerangka Integrasi Tiga Aspek*

Kerangka konseptual pada Gambar 1 menghubungkan hasil sintesis dalam tiga tahap yang saling memengaruhi. Pilihan material dan proses manufaktur menentukan batas geometri, termasuk ukuran kanal, ketebalan dinding, serta tingkat kekasaran. Geometri kemudian memengaruhi pola aliran dan kondisi perpindahan panas yang dialami media termal. Sebaliknya, viskositas, ukuran partikel, serta kestabilan dispersi juga membatasi ukuran kanal yang dapat digunakan. Dengan mempertimbangkan hubungan dua arah tersebut, penilaian desain CHE perlu menggabungkan kriteria struktural, termal, dan hidraulik.

Analisis eksergi digunakan sebagai dasar evaluasi bersama terhadap berbagai pilihan tersebut. Suatu perubahan desain perlu dibandingkan berdasarkan pengaruhnya terhadap generasi entropi akibat perpindahan panas dan akibat gesekan, dengan tetap memperhatikan batas temperatur, tekanan, dan biaya. Kerangka ini membantu menyusun pertanyaan desain dan mengidentifikasi kebutuhan pengujian lanjutan. Namun, kerangka pada Gambar 1 belum dibuktikan melalui satu rangkaian eksperimen atau simulasi terpadu; oleh karena itu, kerangka tersebut belum dapat dianggap sebagai prosedur optimasi yang tervalidasi.

### *3.5 Keterbatasan Tinjauan*

Tinjauan ini memiliki beberapa keterbatasan. Penelusuran terutama dilakukan melalui ScienceDirect dan diperluas menggunakan sumber tambahan; Scopus serta Web of Science tidak ditelusuri secara terpisah. Kondisi operasi studi yang diikutkan juga beragam, mencakup material, ukuran kanal, media termal, bilangan Reynolds, serta definisi indikator kinerja yang berbeda. Akibatnya, nilai peningkatan kinerja dari satu penelitian tidak dapat langsung dibandingkan dengan penelitian lain. Kajian tidak melakukan meta-analisis, dan sintesis disajikan secara naratif-kualitatif. Selain itu, hasil positif mungkin lebih banyak terwakili dalam literatur yang terpublikasi. Prosedur seleksi dan penilaian kualitas belum menyertakan pengukuran kesepakatan antarpenilai, dan terdapat rujukan tambahan di luar korpus utama. Keterbatasan tersebut harus diperhatikan sebelum kerangka konseptual digunakan untuk menyusun keputusan desain.

## 4. KESIMPULAN

Kajian ini menyintesis strategi desain penukar kalor kompak berdasarkan 59 publikasi melalui tiga aspek yang saling terkait: inovasi struktural, rekayasa media termal, dan evaluasi eksergi. Literatur menunjukkan bahwa manufaktur aditif memungkinkan pembuatan matriks monolitik dan topologi TPMS dengan luas permukaan spesifik yang tinggi. Namun, kekasaran, cacat internal, toleransi ketebalan dinding, kesulitan pembuangan serbuk, serta biaya masih membatasi penerapan industri. Oleh karena itu, kemampuan fabrikasi dan verifikasi integritas struktur harus dipertimbangkan sejak tahap perancangan.

Nanofluida menawarkan peluang peningkatan perpindahan panas, sedangkan PCM membantu meredam fluktuasi beban melalui penyimpanan panas laten. Manfaat keduanya bergantung pada kondisi operasi: viskositas yang lebih tinggi, aglomerasi nanopartikel, serta

histeresis PCM dapat membatasi perolehan kinerja. Analisis eksergi melengkapi evaluasi energi dengan membedakan irreversibilitas akibat beda temperatur dan akibat gesekan aliran. Pendekatan tersebut diperlukan agar peningkatan perpindahan panas tidak dinilai terpisah dari penalti hidrauliknya.

Kontribusi utama kajian ini adalah kerangka konseptual yang menghubungkan kemampuan manufaktur, pemilihan geometri, karakteristik media termal, dan destruksi eksergi sebagai dasar penyaringan alternatif desain CHE. Kerangka ini belum divalidasi secara terpadu, sehingga hasilnya lebih tepat digunakan untuk merumuskan arah penelitian daripada menetapkan rancangan yang optimal. Penelitian berikutnya perlu menguji keterkaitan ketiga aspek melalui pengukuran kehilangan tekanan dan kinerja termal pada geometri hasil fabrikasi, evaluasi kestabilan nanofluida selama siklus panjang, serta simulasi transien yang memadukan perilaku PCM dan analisis eksergi.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan penghargaan dan terima kasih kepada Program Studi Magister Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Riau, atas dukungan dan fasilitas yang diberikan selama penyusunan tinjauan ini.

## KONFLIK KEPENTINGAN

Para penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan finansial maupun hubungan pribadi yang dapat dinilai memengaruhi hasil atau pembahasan dalam artikel ini.

## PERNYATAAN PENGGUNAAN KECERDASAN BUATAN

Dalam penyusunan dan revisi manuskrip, penulis menggunakan teknologi kecerdasan buatan generatif untuk membantu penyuntingan bahasa, penelusuran referensi, penyusunan draf sebagian teks revisi, dan penilaian awal kualitas studi. Seluruh keluaran telah diperiksa, diverifikasi terhadap sumber primer, dan disunting oleh penulis. Penulis bertanggung jawab penuh atas ketepatan sitasi, interpretasi ilmiah, dan isi akhir artikel.

## KONTRIBUSI PENULIS

Ulil Amri Isnain Hasibuan : Konseptualisasi, Metodologi, Investigasi, Kurasi Data, Analisis Formal, Visualisasi, Penulisan - Draf Awal.
Azridjal Aziz : Supervisi, Administrasi Proyek, Validasi, Penulisan - Tinjauan dan Penyuntingan
Seluruh penulis telah memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pelaksanaan penelitian, penyusunan naskah, serta telah membaca, meninjau, dan menyetujui versi akhir naskah untuk dipublikasikan.

## DAFTAR PUSTAKA

Adam, A. Y., Oumer, A. N., Najafi, G., Ishak, M., Firdaus, M., & Aklilu, T. B. (2020). State of the art on flow and heat transfer performance of compact fin-and-tube heat exchangers. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 139(4), 2739–2768.

Ahmad, M., Goraya, T. S., Ur, A., Yaqoob, H., Ikhlaq, M., Wakil, M., & Zubair, S. M. (2022). A comprehensive design and optimization of an offset strip-fin compact heat exchanger for energy recovery systems. Energy Conversion and Management: X, 14, 100191.

Ajeeb, W., & Murshed, S. M. S. (2022). Nanofluids in compact heat exchangers for thermal applications: A state-of-the-art review. Thermal Science and Engineering Progress, 30, 101276.

Aksoy, Y. T. (2025). Nanofluids for sustainable heat transfer enhancement: Beyond thermal conductivity. Sustainability, 17(17), 8006.

Alamu, S. O., Lee, S. W., & Qian, X. (2023). Exergy and energy analysis of the shell-and-tube heat exchanger for a poultry litter co-combustion process. Processes, 11(8), 2249.

Alteneiji, M., Ali, M. I. H., Khan, K. A., & Al-Rub, R. K. A. (2022). Heat transfer effectiveness characteristics maps for additively manufactured TPMS compact heat exchangers. Energy Storage and Saving, 1(3), 153–161.

Amara, K., Saghir, M. Z., & Abdeljabar, R. (2025). Review of triply periodic minimal surface (TPMS) structures for cooling heat sinks. Energies, 18(18), 4920.

Ashrafizadeh, S. A. (2019). Application of second law analysis in heat exchanger systems. Entropy, 21(6), 606.

Assaf, Y. H., Akroot, A., Alnamasi, K., & Ismail, M. A. (2025). Investigation of heat transfer performance in heat exchangers using hybrid nanofluids and twisted tape inserts with fixed special rings. Scientific Reports, 15(1), 1–20.

Barz, T. (2021). Paraffins as phase change material in a compact plate-fin heat exchanger – Part II: Validation of the “curve scale” hysteresis model for incomplete phase transitions. Journal of Energy Storage, 34, 102164.

Barz, T., & Emhofer, J. (2021). Paraffins as phase change material in a compact plate-fin heat exchanger – Part I: Experimental analysis and modeling of complete phase transitions. Journal of Energy Storage, 33, 102128.

Beer, M., & Rybár, R. (2024). Optimisation of heat exchanger performance using modified gyroid-based TPMS structures. Processes, 12(12), 2943.

Bouselsal, M., Mebarek-Oudina, F., Biswas, N., & Ismail, A. A. I. (2023). Heat transfer enhancement using Al2O3-MWCNT hybrid-nanofluid inside a tube/shell heat exchanger with different tube shapes. Micromachines, 14(5), 1072.

Cabeza, L. F., Martínez, F. R., Borri, E., Ushak, S., & Prieto, C. (2024). Thermal energy storage using phase change materials in high-temperature industrial applications: Multi-criteria selection of the adequate material. Materials, 17(8), 1878.

Capitao Patrao, A., Jonsson, I., Xisto, C., Lundbladh, A., & Grönstedt, T. (2024). Compact heat exchangers for hydrogen-fueled aero engine intercooling and recuperation. Applied Thermal Engineering, 243, 122538.

Careri, F., Khan, R. H. U., Todd, C., & Attallah, M. M. (2023). Additive manufacturing of heat exchangers in aerospace applications: A review. Applied Thermal Engineering, 235, 121387.

Cheng, J., Wang, W., Yu, J., Jiang, H., Gao, J., & Xu, D. (2024). Research of heat transfer characteristics of supercritical CO2 in spiral tube heat exchangers. Energies, 17(23), 5960.

Chouhan, G., Namdeo, A. K., Guner, A., Essa, K., & Bidare, P. (2026). Heat transfer performance of compact TPMS lattice heat sinks via metal additive manufacturing. Progress in Additive Manufacturing, 11(1), 593–610.

Das, S., Rasouli, E., Ziev, T., Lamprinakos, N., Seo, J., Rollett, A., Vaishnav, P., & Narayanan, V. (2024). Design and techno-economic optimization of an additively manufactured compact heat exchanger for high temperature and high pressure applications. Applied

Thermal Engineering, 245, 122778.
Dassi, L., Chatterton, S., Parenti, P., & Pennacchi, P. (2024). Gyroid lattice heat exchangers: Comparative analysis on thermo-fluid dynamic performances. Machines, 12(12), 922.
Ding, Y., Guo, Q., Guo, W., Chu, W., & Wang, Q. (2024). Review of recent applications of heat pipe heat exchanger use for waste heat recovery. Energies, 17(11), 2504.
Dixit, T., Al-Hajri, E., Paul, M. C., Nithiarasu, P., & Kumar, S. (2022). High performance, microarchitected, compact heat exchanger enabled by 3D printing. Applied Thermal Engineering, 210, 118339.
Fiedler, T., Movahedi, N., & Stanger, R. (2024). On the efficiency of air-cooled metal foam heat exchangers. Metals, 14(7), 750.
Ibáñez, S. E., Quintero, A. E., & Vera, M. (2025). Second-law analysis of mini/micro counterflow parallel-plate heat exchangers: Optimizing effectiveness by minimizing wall entropy production. Heat Transfer, 54(7), 4536–4554.
Inkoferer, J., Kožulović, D., & Bitter, M. (2026). A compact low-loss additive-manufactured redirecting heat exchanger (CLARE): The evolution of aerodynamic efficiency. Results in Engineering, 29, 108618.
Jamshidmofid, M., Olfati, M., Arabkoohsar, A., & Abbassi, A. (2023). Entropy generation and exergy destruction in two types of wavy microchannels working with various aqueous nanofluids using a multi-phase mixture model. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 148(9), 3711–3729.
Khouri, O., Goshayeshi, H. R., Mousavi, S. B., Hosseini Nami, S., & Zeinali Heris, S. (2024). Heat transfer enhancement in industrial heat exchangers using graphene oxide nanofluids. ACS Omega, 9(22), 24025–24038.
Kilic, G. A. (2025). Performance evaluation of triply periodic minimal surface heat exchangers using nanofluids at high flow rates for enhanced energy efficiency. Applied Sciences, 15(8), 4140.
Łach, Ł. (2026). Computational entropy modeling for sustainable energy systems: A review of numerical techniques, optimization methods, and emerging applications. Energies, 19(3), 728.
Li, N., Wang, M., Zhao, J., Sun, K., Bi, C., Du, M., You, E., & Yang, M. (2025). Heat transfer characterization of TPMS heat exchangers applied to the aerospace field. Frontiers in Heat and Mass Transfer, 23(2), 601–614.
Liu, J., Cheng, D., Oo, K., McCrimmon, T. L., & Bai, S. (2024a). Design and additive manufacturing of TPMS heat exchangers. Applied Sciences, 14(10), 3970.
Liu, J., Cheng, D., Oo, K., Pan, W., McCrimmon, T. L., & Bai, S. (2024b). Optimization of triply periodic minimal surface heat exchanger to achieve compactness, high efficiency, and low-pressure drop. Energies, 17(20), 5141.
Louis, S. P., Ushak, S., Milian, Y., Nemś, M., & Nemś, A. (2022). Application of nanofluids in improving the performance of double-pipe heat exchangers—A critical review. Materials, 15(19), 6879.
Meng, B., Wan, M., Zhao, R., Zou, Z., & Liu, H. (2021). Micromanufacturing technologies of compact heat exchangers for hypersonic precooled airbreathing propulsion: A review. Chinese Journal of Aeronautics, 34(2), 79–103.
Messenger, M. A., Manglik, R. M., & Boetcher, S. K. S. (2024). Thermal energy storage heat exchanger design: Overcoming low thermal conductivity limitations of phase-change materials. ASME Journal of Heat and Mass Transfer, 146(5), 054501.
Mirahmad, A., Kumar, R. S., Doldán, B. P., Rios, C. P., & Díez-Sierra, J. (2025). Beyond thermal conductivity: A review of nanofluids for enhanced energy storage and heat transfer. Nanomaterials, 15(4), 302.
Mohamed, M. A. E. M., Meana-Fernández, A., González-Caballín, J. M., Bowman, A., & Gutiérrez-Trashorras, A. J. (2024). Numerical study of a heat exchanger with a rotating tube using nanofluids under transitional flow. Processes, 12(1), 222.
Mokrane, M., & Bourouis, M. (2024). Heat transfer and fluid flow characteristics in a micro heat exchanger employing warm nanofluids for cooling of electronic components. Energies, 17(10), 2383.
Oh, S. H., An, C. H., Seo, B., Kim, J., Park, C. Y., & Park, K. (2023). Functional morphology change of TPMS structures for design and additive manufacturing of compact heat exchangers. Additive Manufacturing, 76, 103778.
Oh, S. H., Kim, J. E., Jang, C. H., Kim, J., Park, C. Y., & Park, K. (2025). Multifunctional gradations of TPMS architected heat exchanger for enhancements in flow and heat exchange performances. Scientific Reports, 15(1), 19931.
Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., … Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ, 372, n71.
Passoni, S., Ferrario, A., Ricotti, M. E., & Mereu, R. (2024). Experimental investigation of two-phase flow in Chevron-type compact plate heat exchangers: A study on pressure drops and flow regimes visualization. Applied Thermal Engineering, 242, 122542.
Pereira, J., Moita, A., & Moreira, A. (2023). Nanofluids as a waste heat recovery medium: A critical review and guidelines for future research and use. Processes, 11(8), 2443.
Pracht, S., Will, J., Klöppel, S., Funke, T., Quack, H., & Haberstroh, C. (2022). Experimental and numerical study of a 3D-printed aluminium cryogenic heat exchanger for compact Brayton refrigerators. Cryogenics, 123, 103418.
Rauch, M., Mudrinić, S., & Galović, A. (2022). Detailed analysis of exergy destruction of all basic types of heat exchangers. Processes, 10(2), 249.
Safarzadeh, S., Yousefi, M., Kazemi, M., & Kianifar, A. (2023). Energy, exergy, and economic (3E) analyses of nanoparticle-enriched phase change material in an air–PCM heat exchanger applied for buildings free cooling. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 148(16), 8533–8545.
Safikhani, H., Aali, M., & Davoodababadi Farahani, S. (2024). Optimal arrangement of rotating hot cylinders in a compact heat exchanger based on energy and exergy analysis. Ain Shams Engineering Journal, 15(2), 102378.
Saghir, M. Z., & Yahya, M. (2024). Convection heat transfer and performance analysis of a triply periodic minimal surface (TPMS) for a novel heat exchanger. Energies, 17(17), 4275.
Shah, R. K., & Sekulić, D. P. (2003). Fundamentals of heat exchanger design. John Wiley & Sons.
Su, X., Zhang, Y., Rao, Y., Yeranee, K., & Wang, X. (2025). Experimental and numerical study on flow and heat transfer characteristics of additively manufactured triply periodic minimal surface (TPMS) heat exchangers for micro gas turbine. Aerospace, 12(5), 416.
Tekir, M. (2025). Experimental study on the thermal performance of hybrid nanofluid in a compact plate heat exchanger under the influence of a magnetic field. Case Studies in Thermal Engineering, 69, 106031.
Theologou, K., Hofer, M., Mertz, R., Buck, M., Laurien, E., & Starflinger, J. (2021). Experimental investigation and modelling of steam-heated supercritical CO2 compact cross-flow heat exchangers. Applied Thermal Engineering, 190, 116352.
Venkatesh, B., Kiran, A., Khan, M., Rahmani, M. K. I., Upadhyay, L., Babu, J. C., & Narayana, T. L. (2024). Performance optimization

for an optimal operating condition for a shell and heat exchanger using a multi-objective genetic algorithm approach. PLOS ONE, 19(6), e0304097.

Wang, T., Jin, Y., & Alam, F. (2024). Study on phase change materials' heat transfer characteristics of medium temperature solar energy collection system. Materials, 17(21), 5159.

Wciślik, S., & Taler, D. (2024). Economic and exergy analysis of TiO2 + SiO2 ethylene-glycol-based hybrid nanofluid in plate heat exchange system of solar installation. Energies, 17(13), 3107.

Wu, J., Li, Z., Jian, W., & Ma, D. (2026). Experimental investigation into stability, heat transfer, and flow characteristics of TiO2-SiO2 hybrid nanofluids under multiple influencing factors. Nanomaterials, 16(6), 359.

Ye, W., Jamshideasli, D., & Khodadadi, J. M. (2023). Improved performance of latent heat energy storage systems in response to utilization of high thermal conductivity fins. Energies, 16(3), 1277.

Yeranee, K., & Rao, Y. (2022). A review of recent investigations on flow and heat transfer enhancement in cooling channels embedded with triply periodic minimal surfaces (TPMS). Energies, 15(23), 8994.

Yilmaz Aydin, D. (2025). Thermal and exergetic performance analyses of a heat pipe heat exchanger using CMC/Co3O4-based non-Newtonian nanofluids. Applied Sciences, 15(14), 7831.

Zhang, J., & Yang, X. (2025). Numerical simulation of convective heat transfer in gyroid, diamond, and primitive microstructures using water as the working fluid. Energies, 18(5), 1230.

Zhou, Y., Li, Z., & Zhai, Y. (2025). Thermal–hydraulic performance comparison of printed circuit heat exchangers with identical-size and hybrid-size unit channels. Energies, 18(8), 1947.

Ziyadanogullari, N. B., & Percin, S. (2024). An experimental investigation of the effects of using hexagonal BN–water nanofluids on the thermal performance and pressure drop of a concentric tube heat exchanger. Energies, 17(6), 1269.