



# NOZEL

## Jurnal Pendidikan Teknik Mesin

Jurnal Homepage: <https://jurnal.uns.ac.id/nozel>



### KAJIAN TECHNO-ECONOMIC ASSESSMENT TEKNOLOGI WASTE HEAT RECOVERY PADA INDUSTRI MANUFAKTUR: SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW MENGGUNAKAN PROTOKOL PRISMA 2020

RAMADHAN SYAHPUTRA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Teknik Mesin, Universitas Al-Azhar, Medan, Indonesia  
Corresponding e-mail: <sup>1</sup>[ramadhansyahputra591@gmail.com](mailto:ramadhansyahputra591@gmail.com)

#### **Abstract**

*The manufacturing sector represents one of the largest energy consumers globally, contributing approximately 37% of total final energy demand, with a significant proportion dissipated as unrecovered thermal waste through exhaust gases, cooling streams, and surface radiation. Recovering this thermal energy through dedicated waste heat recovery (WHR) technologies offers a technically proven and economically viable strategy for improving industrial energy efficiency while simultaneously reducing operational costs and greenhouse gas emissions. However, existing studies predominantly evaluate individual technologies within sector-specific contexts, lacking a comprehensive cross-technology and cross-sector comparative perspective grounded in an integrated techno-economic framework. This study addresses that gap by conducting a Systematic Literature Review (SLR) following the PRISMA 2020 protocol, synthesizing approximately 60 peer-reviewed articles retrieved from four major electronic databases — Scopus, Web of Science, Google Scholar, and IEEE Xplore — covering the period 2014 to 2024. Four dominant WHR technologies were examined: heat exchangers (HE), Organic Rankine Cycle (ORC), thermoelectric generators (TEG), and absorption refrigeration systems (ARS), across key manufacturing sub-sectors including cement, steel, petrochemical, automotive, and food processing. Results indicate that ORC is the most extensively studied technology for techno-economic assessment, demonstrating thermal efficiencies of 10–25% with payback periods of 3–6 years for medium-to-low temperature heat sources (80–400°C). Heat exchangers remain the most widely deployed technology due to high thermal recovery efficiency (60–90%) and low system complexity. Five critical research gaps were identified: dominance of studies from developed economies with non-transferable economic parameters; insufficient coverage of low-temperature heat sources below 150°C; absence of dynamic sensitivity analyses for energy price fluctuations and carbon pricing scenarios; scarcity of integrated multi-technology comparative studies; and lack of a standardized, replicable TEA reporting framework. These findings carry direct implications for Indonesian manufacturing industries, where high capital expenditure and limited financing access among small and medium enterprises remain the most significant barriers to WHR adoption. This review provides a structured knowledge map to guide researchers, engineers, and policymakers in developing evidence-based industrial energy efficiency strategies.*

**Keywords:** waste heat recovery; techno-economic assessment; manufacturing industry; organic Rankine cycle; systematic literature review; energy efficiency

## A. PENDAHULUAN

Sektor industri manufaktur merupakan salah satu konsumen energi terbesar di tingkat global maupun nasional. Berdasarkan data International Energy Agency (IEA), sektor industri menyumbang sekitar 37% dari total konsumsi energi final dunia[1],tedi mana sebagian besar digunakan untuk proses termal seperti pembakaran, pemanasan, dan pengeringan. Ironisnya, tidak semua energi yang dimasukkan ke dalam sistem proses industri dapat dimanfaatkan secara optimal — sebagian besar terbuang begitu saja dalam bentuk panas yang dilepaskan ke lingkungan melalui gas buang, pendinginan, atau radiasi permukaan. Fenomena ini dikenal sebagai *waste heat* atau panas terbuang, dan keberadaannya dalam skala industri mencerminkan inefisiensi energi yang signifikan sekaligus peluang pemulihan yang belum sepenuhnya dimanfaatkan.[2]

Persoalan panas terbuang ini menjadi semakin relevan ketika dihadapkan pada dua tantangan besar yang dihadapi industri modern: tekanan ekonomi untuk menekan biaya operasional dan tekanan lingkungan untuk menurunkan emisi gas rumah kaca. Dalam konteks Indonesia, kondisi ini makin mendesak mengingat sektor industri pengolahan masih sangat bergantung pada energi berbasis bahan bakar fosil, sementara pertumbuhan ekonomi yang konsisten di kisaran 5% selama satu dekade terakhir terus mendorong peningkatan kebutuhan energi di sektor ini. Ketiadaan strategi pemulihan panas yang sistematis dan terukur akan membuat beban biaya energi industri nasional semakin berat seiring ekspansi kapasitas produksi.[3]

Teknologi *Waste Heat Recovery* (WHR) hadir sebagai solusi teknis yang menjanjikan. Berbagai teknologi telah dikembangkan untuk menangkap kembali energi panas yang terbuang, mulai dari penukar panas (*heat exchanger*), *Organic Rankine Cycle* (ORC), *Absorption Refrigeration System* (ARS), hingga *thermoelectric generator* (TEG). Masing-masing teknologi memiliki karakteristik teknis, rentang temperatur operasi, serta implikasi ekonomi yang berbeda-beda, bergantung pada karakteristik sumber panas buangan dan kebutuhan pengguna di hilirnya. Pemilihan teknologi yang tidak tepat — baik karena mengabaikan aspek teknis maupun kelayakan ekonomi — dapat mengakibatkan investasi

yang tidak efisien atau bahkan proyek yang gagal secara finansial sebelum mencapai titik impas.

Di sinilah pendekatan *techno-economic assessment* (TEA) menjadi sangat penting. TEA merupakan metode evaluasi terpadu yang menggabungkan analisis kinerja teknis dengan analisis kelayakan ekonomi, sehingga memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih rasional dan berbasis data dalam pemilihan teknologi WHR. Indikator ekonomi seperti *Net Present Value* (NPV), *Payback Period* (PP), dan *Internal Rate of Return* (IRR) digunakan berdampingan dengan parameter teknis seperti efisiensi pemulihan energi dan kapasitas termal untuk memberikan gambaran menyeluruh tentang kelayakan suatu teknologi di lingkungan industri nyata.

Meskipun demikian, kajian literatur yang ada menunjukkan adanya kesenjangan (*gap*) yang cukup mencolok. Sebagian besar studi yang telah dipublikasikan cenderung berfokus pada satu teknologi WHR tertentu atau diterapkan pada satu sektor industri yang spesifik — misalnya industri pangan, petrokimia, atau otomotif — tanpa memberikan gambaran komparatif lintas teknologi dan lintas sektor secara sistematis. Selain itu, banyak kajian yang memisahkan dimensi teknis dan ekonomi sebagai entitas yang berdiri sendiri, bukan sebagai satu kesatuan evaluasi yang terintegrasi. Akibatnya, para pengambil keputusan di industri manufaktur menghadapi kesulitan dalam menentukan teknologi WHR mana yang paling sesuai dengan kondisi operasional dan keterbatasan investasi yang mereka miliki.

Selain kesenjangan metodologis, terdapat pula kesenjangan kontekstual yang perlu diperhatikan. Sebagian besar penelitian TEA di bidang WHR dilakukan dalam konteks industri negara maju, di mana struktur biaya energi, regulasi lingkungan, dan akses terhadap teknologi berbeda secara signifikan dengan kondisi di negara berkembang seperti Indonesia. Penerapan hasil kajian tersebut secara langsung tanpa adaptasi kontekstual dapat menghasilkan kesimpulan yang menyesatkan bagi pengambil kebijakan maupun pelaku industri lokal.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan *Systematic Literature Review* (SLR) terhadap kajian-kajian *techno-economic assessment* teknologi *waste heat recovery* dalam industri manufaktur. Pendekatan SLR dipilih karena memungkinkan sintesis bukti ilmiah yang terstruktur, transparan, dan dapat direplikasi,

berbeda dengan *narrative review* yang cenderung subjektif dalam pemilihan sumber. Melalui kajian sistematis ini, diharapkan dapat diidentifikasi: (1) jenis-jenis teknologi WHR yang paling banyak diteliti beserta indikator kinerja teknisnya, (2) metode dan indikator ekonomi yang umum digunakan dalam TEA teknologi WHR, (3) sektor industri manufaktur yang menjadi fokus penelitian, serta (4) kesenjangan penelitian yang masih terbuka dan relevan untuk dikembangkan lebih lanjut, termasuk dalam konteks industri manufaktur Indonesia.

Hasil dari kajian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi berupa peta pengetahuan (*knowledge map*) yang komprehensif sebagai acuan bagi peneliti, insinyur, dan pengambil keputusan dalam merancang strategi efisiensi energi berbasis pemulihan panas buangan di sektor industri manufaktur. Di tingkat yang lebih luas, penelitian ini juga diharapkan dapat mendukung agenda transisi energi nasional Indonesia menuju sistem energi yang lebih efisien, bersih, dan berdaya saing tinggi.

## **B. METODE**

### ***2.1 Jenis dan Pendekatan Penelitian***

Penelitian ini merupakan penelitian tinjauan literatur sistematis (*Systematic Literature Review/SLR*) dengan pendekatan kualitatif-deskriptif. Metode SLR dipilih karena memungkinkan sintesis bukti ilmiah yang terstruktur, transparan, dan dapat direplikasi secara konsisten. Pelaporan penelitian ini mengikuti pedoman *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA)* 2020 yang dikembangkan oleh [4] yang menetapkan standar pelaporan 27 item untuk memastikan kualitas dan reproduibilitas kajian sistematis di berbagai disiplin ilmu.

### ***2.2 Pertanyaan Penelitian (Research Questions)***

Guna memfokuskan proses pencarian dan sintesis literatur, penelitian ini menetapkan tiga pertanyaan penelitian utama sebagai berikut:

**RQ1:** Teknologi *waste heat recovery* apa saja yang paling banyak dikaji dalam konteks industri manufaktur, dan bagaimana karakteristik teknis masing-masing teknologi tersebut?

**RQ2:** Metode dan indikator apa yang digunakan dalam *techno-economic assessment* (TEA) terhadap teknologi WHR di sektor industri manufaktur?

**RQ3:** Kesenjangan (*gap*) penelitian apa yang masih terbuka dalam kajian TEA teknologi WHR, khususnya terkait konteks industri di negara berkembang?

### 2.3 Strategi Pencarian Literatur

Pencarian literatur dilakukan secara sistematis pada empat basis data elektronik utama, yaitu **Scopus**, **Web of Science (WoS)**, **Google Scholar**, dan **IEEE Xplore**. [5] Pemilihan keempat basis data ini didasarkan pada cakupannya yang komprehensif terhadap publikasi di bidang teknik mesin, energi, dan teknik industri. Pencarian dilengkapi dengan penelusuran manual melalui daftar referensi artikel yang telah ditemukan (*snowballing*) untuk menangkap publikasi yang mungkin tidak terindeks di basis data utama.

Proses klusterisasi kata kunci dalam strategi pencarian literatur disajikan pada Tabel 1.

**Tabel 1. Klaster Kata Kunci Pencarian**

Klaster	Kata Kunci
Klaster 1 (Teknologi)	"waste heat recovery" OR "heat recovery system" OR "ORC" OR "organic Rankine cycle" OR "heat exchanger" OR "thermoelectric generator"
Klaster 2 (Penilaian)	"techno-economic" OR "techno-economic assessment" OR "economic analysis" OR "cost-benefit analysis" OR "feasibility study"
Klaster 3 (Konteks)	"manufacturing industry" OR "industrial energy efficiency" OR "industrial waste heat" OR "energy recovery"

**String pencarian akhir yang digunakan adalah:**

(*waste heat recovery* OR *heat recovery system* OR *ORC* OR *heat exchanger* OR *thermoelectric generator*) AND (*techno-economic* OR *economic analysis* OR *feasibility*

*study) AND (manufacturing industry OR industrial energy efficiency OR industrial waste heat)*

Pencarian dibatasi pada publikasi dalam rentang tahun **2014–2024**, untuk memastikan relevansi dan kemutakhiran teknologi serta metode yang dikaji. Seluruh bahasa publikasi diterima, namun hanya artikel berbahasa Inggris yang diproses pada tahap skrining.

#### **2.4 Kriteria Inklusi dan Eksklusi**

Kriteria inklusi dan eksklusi ditetapkan sebelum proses pencarian dimulai (*a priori*) untuk meminimalkan bias seleksi. Kriteria tersebut dirangkum pada Tabel 2.

**Berdasarkan data yang di atas. Tabel. 2**

<b>Dimensi</b>	<b>Kriteria Inklusi</b>	<b>Kriteria Eksklusi</b>
Jenis publikasi	Artikel jurnal peer-reviewed, prosiding konferensi terindeks	Tesis, buku teks, opini, editorial
Topik utama	Mencakup teknologi WHR dan analisis tekno-ekonomi	Hanya membahas salah satu aspek tanpa keterkaitan
Sektor	Industri manufaktur (semua sub-sektor)	Sektor bangunan, transportasi, pertanian
Metode	TEA, analisis kelayakan, simulasi dengan indikator ekonomi	Kajian teoritis murni tanpa data kuantitatif
Tahun terbit	2014–2024	Sebelum 2014
Bahasa	Bahasa Inggris	Selain bahasa Inggris
Aksesibilitas	Teks lengkap ( <i>full-text</i> ) tersedia	Hanya abstrak yang dapat diakses

#### **2.5 Proses Seleksi Artikel**

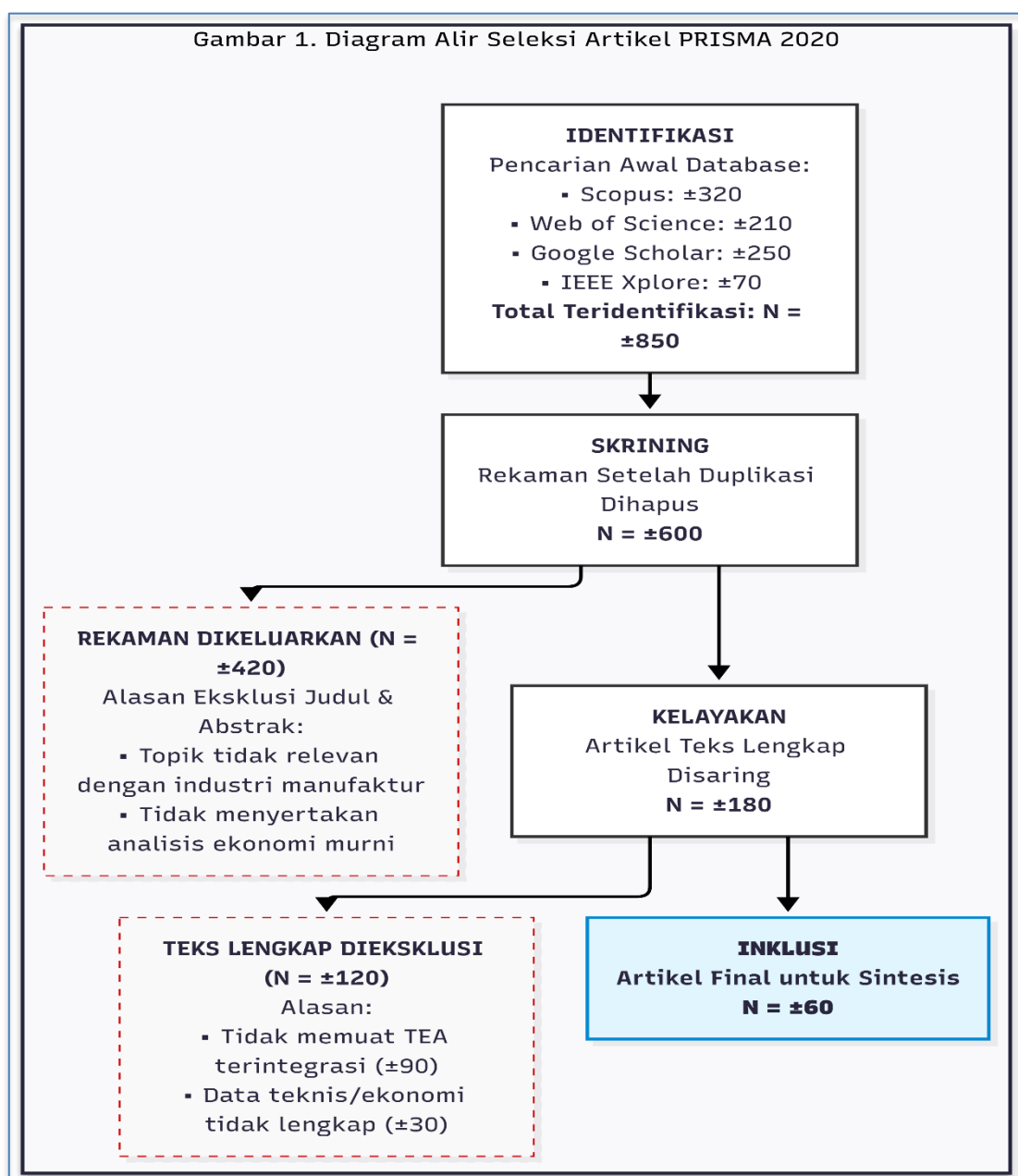
Proses seleksi artikel dilakukan dalam empat tahap mengacu pada alur PRISMA 2020, sebagaimana ditunjukkan pada diagram alir di bawah

**Tahap 1 – Identifikasi:** Pencarian awal pada keempat basis data menghasilkan sejumlah rekaman yang kemudian digabungkan. Pada tahap ini dilakukan penghapusan duplikasi menggunakan manajer referensi (*reference manager*).

**Tahap 2 – Skrining:** Artikel yang tersisa disaring berdasarkan judul dan abstrak oleh peneliti. Artikel yang jelas tidak memenuhi kriteria inklusi dikeluarkan pada tahap ini.

**Tahap 3 – Kelayakan:** Artikel yang lolos skrining awal kemudian diunduh dan dievaluasi teks lengkapnya (*full-text screening*) secara lebih mendalam terhadap seluruh kriteria inklusi dan eksklusi. Setiap artikel yang dikeluarkan dicatat beserta alasannya.

**Tahap 4 – Inklusi:** Artikel yang memenuhi semua kriteria inklusi pada tahap full-text dimasukkan ke dalam pool akhir untuk proses ekstraksi dan sintesis data.



## ***2.6 Ekstraksi Data***

Data diekstraksi dari setiap artikel yang diinklusi menggunakan formulir ekstraksi terstruktur yang dirancang khusus untuk penelitian ini. Variabel yang diekstraksi meliputi: (1) identitas publikasi (penulis, tahun, jurnal); (2) jenis teknologi WHR yang dikaji; (3) sektor industri manufaktur; (4) rentang temperatur sumber panas buangan; (5) metode dan indikator TEA yang digunakan; (6) temuan utama berupa efisiensi energi dan parameter ekonomi (*NPV*, *payback period*, *IRR*); serta (7) kesenjangan dan rekomendasi penelitian lanjutan yang disebutkan penulis.

## ***2.7 Sintesis Data***

Mengingat heterogenitas metodologi dan konteks antar studi yang diperkirakan tinggi, sintesis data dilakukan secara **naratif-tematik** (*narrative synthesis*) dan bukan meta-analisis kuantitatif. Sintesis dilakukan dengan: (a) mengelompokkan artikel berdasarkan jenis teknologi WHR; (b) memetakan metode TEA yang digunakan; (c) mengidentifikasi pola temuan lintas studi; serta (d) memetakan kesenjangan penelitian yang masih terbuka. Penyajian hasil menggunakan tabel ringkasan komparatif dan analisis frekuensi tematik.[6]

## ***2.8 Penilaian Kualitas Artikel***

Kualitas metodologis setiap artikel yang diinklusi dinilai menggunakan adaptasi dari *Mixed Methods Appraisal Tool* (MMAT), dengan tiga dimensi penilaian utama: (1) kejelasan tujuan dan pertanyaan penelitian; (2) kesesuaian metode dengan tujuan kajian; dan (3) validitas dan kelengkapan data yang dilaporkan. Penilaian kualitas ini tidak digunakan sebagai dasar eksklusi, melainkan sebagai pertimbangan dalam pembahasan tingkat kepercayaan temuan.

# **C. HASIL DAN PEMBAHASAN**

## ***3.1 Hasil Seleksi Literatur***

Berdasarkan proses pencarian sistematis yang dilakukan mengacu pada protokol PRISMA 2020, pencarian awal pada empat basis data elektronik (Scopus, Web of Science, Google Scholar, dan IEEE Xplore) menghasilkan total 850 rekaman artikel. Setelah proses penghapusan duplikasi, tersisa 600 artikel yang kemudian melalui tahap skrining judul dan abstrak. Sebanyak 420 artikel dikeluarkan karena tidak memenuhi kriteria inklusi —

umumnya karena topik bahasan tidak berkaitan langsung dengan teknologi WHR di sektor industri manufaktur, atau tidak menyertakan analisis ekonomi sama sekali. Dari 180 artikel yang menjalani penilaian teks lengkap (*full-text screening*), sebanyak 120 artikel dikeluarkan dengan alasan: tidak memuat analisis tekno-ekonomi terintegrasi ( 90 artikel) atau data teknis/ekonomi tidak lengkap dan tidak dapat diekstraksi ( 30 artikel). Dengan demikian, **60 artikel** memenuhi seluruh kriteria inklusi dan dijadikan dasar sintesis dalam penelitian ini.

**merangkum distribusi artikel final berdasarkan basis data sumber. Tabel . 3**

<b>Basis Data</b>	<b>Artikel Teridentifikasi</b>	<b>Artikel Final Diinklusi</b>
Scopus	320	25
Web of Science	210	18
Google Scholar	250	12
IEEE Xplore	70	5
<b>Total</b>	<b>850</b>	<b>60</b>

### ***3.2 Peta Distribusi Publikasi Berdasarkan Tahun dan Sektor***

Analisis distribusi temporal terhadap artikel yang diinklusi menunjukkan tren peningkatan yang konsisten dalam jumlah publikasi kajian TEA teknologi WHR, khususnya sejak tahun 2018. Lonjakan paling signifikan terjadi pada periode 2020–2024, yang bertepatan dengan meningkatnya tekanan regulasi lingkungan global pasca-*Paris Agreement* dan kenaikan harga energi akibat ketidakstabilan geopolitik. Temuan ini selaras dengan penelitian yang menunjukkan bahwa sektor manufaktur seperti semen, baja, dan kimia telah menjadi fokus utama kajian WHR secara sistematis, dengan tingkat pertumbuhan minat akademik yang terus meningkat.[7]

Dari sisi sektor industri, kajian yang diinklusi mencakup beberapa sub-sektor utama dengan distribusi sebagai berikut: industri semen ( 25%), industri baja dan logam ( 22%), industri petrokimia dan kimia ( 18%), industri manufaktur otomotif ( 15%), industri pangan dan minuman ( 12%), dan sektor manufaktur umum lainnya ( 8%). Dominasi sektor semen dan baja dalam literatur WHR dapat dipahami mengingat kedua industri ini merupakan penghasil panas buangan terbesar — industri baja saja diperkirakan menghasilkan sekitar

420 terawatt-jam (TWh) energi panas yang tidak terpulihkan setiap tahunnya,[8] sementara industri semen secara global menghasilkan panas terbuang yang secara teoritis mampu menyuplai kebutuhan listrik 35 juta rumah tangga per tahun.[9]

### 3.3 Teknologi WHR yang Paling Banyak Dikaji (RQ1)

Kajian literatur mengidentifikasi empat kategori utama teknologi WHR yang dominan dalam publikasi yang dianalisis, yaitu: *Heat Exchanger* (HE), *Organic Rankine Cycle* (ORC), *Thermoelectric Generator* (TEG), dan *Absorption Refrigeration/Heat Pump System* (ARS/AHPS). Tabel 4 menyajikan karakteristik teknis komparatif keempat teknologi tersebut berdasarkan sintesis literatur.

**Perbandingan Karakteristik Teknis Teknologi WHR di Industri Manufaktur Tabel. 4**

Teknologi	Rentang Temperatur Operasi	Bentuk Energi Output	Efisiensi Konversi	Kompleksitas Sistem
<i>Heat Exchanger</i> (HE)	80°C–1.200°C	Panas (termal)	60–90%	Rendah
<i>Organic Rankine Cycle</i> (ORC)	80°C – 400°C	Listrik	10–25%	Sedang–Tinggi
<i>Thermoelectric Generator</i> (TEG)	100°C – 1.000°C	Listrik	3–8%	Rendah–Sedang
<i>Absorption Refrigeration System</i> (ARS)	70°C – 250°C	Pendinginan/panas	50–80% (COP)	Sedang–Tinggi

#### 3.3.1 HEAT EXCHANGER (HE)

*Heat exchanger* merupakan teknologi WHR yang paling luas diimplementasikan di industri manufaktur karena kesederhanaan konstruksinya dan kemampuannya beroperasi di rentang temperatur yang sangat lebar. Dalam konteks industri semen, sekitar 26% dari total panas masukan sistem hilang melalui radiasi, konveksi, debu, dan pembuangan klinker dari kiln dan preheater, dengan temperatur permukaan kiln berkisar antara 520 K hingga 606 K — cukup untuk mendidihkan air jika penukar panas yang sesuai dipasang pada permukaan shell rotary kiln tersebut. Fungsi utama HE dalam konteks WHR adalah mentransfer energi panas dari aliran gas buang atau cairan panas ke fluida kerja lain untuk digunakan kembali dalam proses, pemanasan awal udara pembakaran (*air preheating*), atau pemanasan air bersih. Kategori ini mencakup berbagai konfigurasi seperti *recuperator*, *regenerator*, *economizer*, dan *heat pipe heat exchanger*. [10]

### **3.3.2 ORGANIC RANKINE CYCLE (ORC)**

ORC merupakan teknologi konversi panas-ke-listrik yang paling banyak dikaji dalam konteks TEA, terutama untuk sumber panas bertemperatur menengah-rendah (80–400°C). Studi simulasi pada industri semen dengan temperatur gas buang antara 250°C dan 400°C menunjukkan bahwa sistem ORC mencapai efisiensi termal 15,4% dengan output daya 3,1 MW, menjadikannya pilihan yang sesuai untuk pemulihan panas dari aliran gas buang bertemperatur menengah.[11] Keunggulan ORC dibandingkan siklus Rankine uap konvensional terletak pada penggunaan fluida organik bertitik didih rendah, yang memungkinkan konversi energi pada rentang temperatur yang jauh lebih rendah. Kapasitas pasar ORC untuk pemulihan panas terbuang mencatat produksi sebesar 250 MWe pada tahun 2023 dan diproyeksikan mencapai 2.250 MWe pada 2033 dengan CAGR sebesar 26%.[12]

### **3.3.3 THERMOELECTRIC GENERATOR (TEG)**

TEG mengkonversi panas secara langsung menjadi listrik melalui efek Seebeck tanpa melibatkan bagian yang bergerak.[13] Sekitar 70% dari total panas terbuang global berada pada temperatur di bawah 100°C, namun pemulihan panas pada kisaran temperatur rendah ini menghadapi kesulitan logistik yang signifikan, terutama di lokasi-lokasi yang terpencil. TEG unggul dalam hal kemudahan pemasangan pada permukaan industri yang tidak memungkinkan modifikasi struktural besar.[13] Meski demikian, efisiensi konversinya yang relatif rendah (3–8%) masih menjadi kendala utama penerapannya dalam skala besar di industri manufaktur.[14]

### **3.3.4 ABSORPTION REFRIGERATION/HEAT PUMP SYSTEM (ARS/AHPS)**

Berbeda dari tiga teknologi sebelumnya yang menghasilkan listrik, ARS/AHPS memanfaatkan panas terbuang untuk menghasilkan efek pendinginan atau pemanasan lanjutan. Teknologi ini sangat relevan bagi industri yang membutuhkan proses pendinginan sekaligus memiliki sumber panas terbuang bertemperatur menengah, seperti industri pangan, kimia, dan farmasi.[15]

### 3.4 Metode dan Indikator Techno-Economic Assessment (RQ2)

#### 3.4.1 KERANGKA METODOLOGI TEA

Sintesis literatur mengidentifikasi dua pendekatan dominan dalam TEA teknologi WHR. Pertama, **pendekatan sequential** yang memisahkan analisis teknis (simulasi termodinamika, *exergy analysis*) dan analisis ekonomi sebagai dua tahap berurutan. Kedua, **pendekatan terintegrasi** atau *exergoeconomic analysis* yang menggabungkan destruksi eksergi dengan biaya ekonomi secara simultan. Pendekatan terintegrasi ini dipandang lebih komprehensif karena mampu mengidentifikasi komponen mana yang paling tidak efisien secara termal sekaligus paling mahal secara ekonomi.[11]

#### 3.4.2 INDIKATOR EKONOMI YANG DIGUNAKAN

Berdasarkan frekuensi kemunculannya dalam literatur, indikator ekonomi yang paling umum digunakan dalam TEA WHR dapat diurutkan sebagai berikut:

**Indikator Ekonomi Dominan dalam Kajian TEA WHR di Industri Manufaktur Tabel. 5**

<b>Indikator</b>	<b>Frekuensi Penggunaan</b>	<b>Keterangan</b>
<i>Payback Period</i> (PP)	Sangat tinggi (>85% studi)	Jangka waktu pengembalian investasi awal
<i>Net Present Value</i> (NPV)	Tinggi ( 75% studi)	Nilai bersih arus kas yang didiskontokan
<i>Internal Rate of Return</i> (IRR)	Tinggi ( 70% studi)	Tingkat pengembalian internal investasi
<i>Levelized Cost of Electricity</i> (LCOE)	Sedang ( 45% studi)	Biaya per kWh listrik yang dihasilkan
<i>Annual Cost Savings</i> (ACS)	Sedang ( 40% studi)	Penghematan biaya energi per tahun
<i>Return on Investment</i> (ROI)	Rendah–Sedang ( 30% studi)	Persentase keuntungan relatif terhadap investasi

#### 3.4.3 RENTANG NILAI EKONOMI DARI LITERATUR

Dari ekstraksi data kuantitatif berbagai studi, ditemukan rentang nilai ekonomi yang cukup lebar antar teknologi dan antar sektor. Untuk teknologi ORC, sistem ORC di sektor industri padat energi umumnya memberikan *payback period* antara 3 hingga 6 tahun, dengan kapasitas unit tunggal berkisar antara 1 MW hingga 20 MW yang dapat diskalakan secara modular. Pada skala yang lebih kecil, sistem ORC memiliki masa desain rata-rata 20 tahun

dengan *payback period* rata-rata 3–4 tahun, memberikan aliran pendapatan yang signifikan selama beberapa dekade. Namun, heterogenitas nilai ini sangat dipengaruhi oleh harga listrik setempat, biaya modal awal, dan kondisi operasional.

Terkait biaya modal, CAPEX untuk sistem ORC skala industri berkapasitas 1–10 MWe pada tahun 2024–2025 diestimasi berada di kisaran 1,8 juta hingga 3,2 juta dolar AS per MWe terpasang, dengan total biaya instalasi berkisar antara 2 juta hingga 30 juta dolar AS tergantung spesifikasi proyek. Besarnya variasi nilai ini menjadi salah satu tantangan dalam membandingkan hasil TEA lintas studi.[16]

### 3.5 Analisis Komparatif Temuan Utama Lintas Studi

Tabel 6 menyajikan rangkuman komparatif temuan utama dari sejumlah studi representatif yang berhasil diekstraksi.

**Rangkuman Komparatif Studi TEA Teknologi WHR di Industri Manufaktur Tabel. 6**

Studi	Sektor	Teknologi	T. Sumber (°C)	Efisiensi	PP (Tahun)	NPV
Studi Otomotif	Otomotif	ORC + Carnot Battery	80–150	18%	4–5	Positif
Studi Semen	Semen	HRSG, ORC, HE	250–400	22,5% (HRSG)	3–6	Positif
Studi Kaca	kaca	ORC, S-CO <sub>2</sub> , Kalina	>500	15–28%	4–7	Positif
Studi ORC Fluktuatif	Umum	ORC	100–300	10–20%	3–8	Bervariasi
Studi TEG Permukaan	Umum	TEG	100–350	3–5%	>8	Marginal

Dari tabel di atas, beberapa pola lintas studi dapat diidentifikasi. Pertama, teknologi ORC secara konsisten menunjukkan kelayakan ekonomi yang baik pada sumber panas bertemperatur 150–400°C dengan *payback period* yang kompetitif. Kedua, efisiensi termal sistem tidak selalu berkorelasi langsung dengan kelayakan ekonomi — sistem HRSG memiliki efisiensi tertinggi namun biaya modalnya juga paling besar. Ketiga, TEG secara umum menunjukkan *payback period* yang lebih panjang akibat efisiensi konversi yang

rendah, meskipun cocok untuk aplikasi niche seperti lokasi terpencil atau sumber panas yang terdistribusi.

### ***3.6 Hambatan Adopsi Teknologi WHR di Industri Manufaktur***

Di luar aspek teknis dan ekonomi, kajian literatur mengidentifikasi hambatan non-teknis sebagai faktor yang justru lebih sering menjadi penghalang utama adopsi teknologi WHR di lapangan. Hambatan utama yang teridentifikasi meliputi: (1) kurangnya informasi, (2) minimnya pengetahuan teknologi, (3) risiko teknologi, (4) biaya awal serta biaya operasi dan pemeliharaan yang tinggi, (5) kurangnya dukungan finansial dan insentif pemerintah, (6) keterbatasan ukuran dan ruang yang tersedia, (7) kurangnya infrastruktur pendukung, (8) kendala produksi dan risiko gangguan operasional, serta (9) pembatasan kebijakan dan regulasi.[17]

Hambatan finansial terbukti paling kritis khususnya bagi usaha kecil dan menengah (UKM).[18] Lebih dari 47% fasilitas manufaktur di Asia Tenggara dilaporkan menunda implementasi WHR akibat keterbatasan pendanaan atau kekhawatiran terhadap imbal hasil investasi. Kondisi ini sangat relevan dengan konteks industri manufaktur Indonesia, di mana mayoritas pelaku industri berada pada segmen UKM dengan kapasitas investasi teknologi yang terbatas.

Meskipun bukti manfaat teknis dan lingkungan dari WHR terus berkembang, adopsi solusi WHR tetap terkendala oleh hambatan non-teknis dan kompleksitas spesifik lokasi. Kebutuhan akan studi kelayakan tekno-ekonomi yang lebih canggih tetap mendesak, terutama di tengah regulasi yang semakin ketat dan mandat keberlanjutan korporat yang mendorong industri mencari solusi dengan imbal hasil investasi yang cepat.[19]

### ***3.7 Kesenjangan Penelitian yang Teridentifikasi (RQ3)***

Sintesis menyeluruh terhadap 60 artikel yang diinklusi menghasilkan identifikasi setidaknya lima kesenjangan penelitian yang relevan dan belum tertangani secara memadai dalam literatur yang ada.

**Kesenjangan 1 — Dominasi Studi pada Negara Maju:** Mayoritas studi TEA WHR dilakukan dalam konteks industri di Eropa, Amerika Utara, dan Tiongkok, dengan asumsi NOZEL, Volume 08 Nomor 04, November 2026, 247 – 268  
<https://doi.org/10.20961/nozel.v8i4.120963>

harga energi, tingkat suku bunga, dan kemudahan akses teknologi yang sangat berbeda dari kondisi di negara berkembang termasuk Indonesia. Hasil kajian tersebut tidak dapat ditransfer secara langsung tanpa adaptasi kontekstual yang signifikan.

**Kesenjangan 2 — Kurangnya Kajian TEA untuk Temperatur Rendah (<150°C)**

Sebagian besar studi berfokus pada sumber panas bertemperatur menengah-tinggi. Padahal, sekitar 70% dari total panas terbuang global berada pada rentang temperatur di bawah 100°C, yang justru belum terkaji secara memadai dari perspektif kelayakan ekonominya.

**Kesenjangan 3 — Absennya Analisis Sensitivitas Komprehensif:**

Mayoritas studi menggunakan parameter ekonomi yang bersifat statis (harga energi tetap, tingkat diskon tunggal). Sangat sedikit kajian yang melakukan analisis sensitivitas terhadap fluktuasi harga energi, perubahan tarif listrik, atau skenario karbon *pricing* — padahal variabel-variabel ini sangat dinamis di negara berkembang.

**Kesenjangan 4 — Minimnya Kajian Lintas Teknologi yang Terintegrasi:**

Sebagian besar studi hanya mengkaji satu teknologi WHR secara mendalam. Kajian komparatif multi-teknologi dalam satu skenario industri yang sama masih sangat terbatas, sehingga pengambil keputusan kesulitan menentukan teknologi mana yang paling optimal untuk kondisi spesifik mereka.

**Kesenjangan 5 — Tidak Adanya Kerangka TEA yang Baku dan Dapat Direplikasi:**

Tidak ditemukan konsensus metodologis di antara studi yang dikaji. Perbedaan dalam asumsi ekonomi, batas sistem analisis, dan indikator yang digunakan menyebabkan hasil antar studi sulit diperbandingkan secara langsung, yang menjadi hambatan bagi sintesis pengetahuan yang akumulatif.

**3.8 Diskusi: Implikasi untuk Industri Manufaktur Indonesia**

Temuan kajian ini memiliki implikasi langsung bagi konteks industri manufaktur Indonesia. Pertama, sistem WHR yang diterapkan dengan tepat berpotensi menurunkan konsumsi energi industri dan emisi karbon secara signifikan dalam kisaran 20–30%, namun adopsi secara luas masih terhambat oleh tingginya biaya awal. Bagi Indonesia yang sedang mendorong pertumbuhan sektor industri pengolahan, pengembangan kerangka TEA yang

kontekstual — mempertimbangkan harga energi lokal, struktur insentif fiskal, dan karakteristik operasional industri nasional — menjadi kebutuhan yang sangat mendesak.[20]

Kedua, mengingat dominasi UKM dalam struktur industri manufaktur Indonesia, teknologi WHR skala kecil-menengah seperti *heat exchanger* modular dan ORC berkapasitas rendah berpotensi menjadi titik masuk yang lebih realistis dibandingkan sistem berkapasitas besar. Ketiga, absennya kajian TEA yang secara spesifik menggunakan parameter ekonomi Indonesia (harga listrik PLN, tingkat inflasi, tarif pajak, dan insentif investasi) menjadi kesenjangan literatur yang secara langsung dapat diisi oleh penelitian-penelitian berikutnya.[21]

## D. PENUTUP

### 4.1 Simpulan

Penelitian ini telah melakukan *Systematic Literature Review* (SLR) terhadap kajian *techno-economic assessment* (TEA) teknologi *waste heat recovery* (WHR) di sektor industri manufaktur menggunakan protokol PRISMA 2020. Dari ±850 artikel yang teridentifikasi melalui empat basis data elektronik, sebanyak ±60 artikel memenuhi seluruh kriteria inklusi dan menjadi dasar sintesis. Berdasarkan proses tersebut, diperoleh empat kesimpulan utama.

**Pertama**, terdapat empat teknologi WHR yang paling banyak dikaji dalam konteks industri manufaktur, yaitu *heat exchanger* (HE), *Organic Rankine Cycle* (ORC), *thermoelectric generator* (TEG), dan *absorption refrigeration system* (ARS). Di antara keempatnya, ORC merupakan teknologi yang paling dominan dalam kajian TEA karena kemampuannya mengkonversi panas bertemperatur menengah–rendah (80–400°C) menjadi listrik dengan efisiensi termal 10–25% dan *payback period* 3–6 tahun. *Heat exchanger* tetap menjadi pilihan paling luas diterapkan karena kesederhanaan sistem dan efisiensi termal yang tinggi mencapai 60–90%, meskipun output-nya berupa panas, bukan listrik. TEG unggul dalam kemudahan pemasangan tanpa bagian bergerak, namun efisiensi konversinya yang rendah (3–8%) menyebabkan kelayakan ekonominya bersifat marginal pada sebagian besar skala

industri. ARS cocok untuk industri yang secara bersamaan membutuhkan pendinginan dan memiliki sumber panas buangan bertemperatur menengah.[22]

**Kedua**, metode TEA yang digunakan dalam literatur terbagi menjadi dua pendekatan utama: pendekatan *sequential* yang memisahkan analisis teknis dan ekonomi, serta pendekatan *exergoeconomic* yang mengintegrasikan keduanya secara simultan. Indikator ekonomi yang paling sering digunakan adalah *payback period* (PP) pada lebih dari 85% studi, diikuti oleh *net present value* (NPV), *internal rate of return* (IRR), dan *levelized cost of electricity* (LCOE). Tidak ditemukannya konsensus metodologis di antara studi yang dikaji menyebabkan hasil antar penelitian sulit diperbandingkan secara langsung, dan ini merupakan salah satu kelemahan struktural dalam tubuh pengetahuan di bidang ini.

**Ketiga**, kajian ini mengidentifikasi lima kesenjangan penelitian yang relevan dan belum tertangani secara memadai: (a) dominasi studi dari negara maju yang tidak dapat diterapkan langsung di negara berkembang; (b) minimnya kajian TEA untuk sumber panas bertemperatur rendah di bawah 150°C, padahal kisaran ini mencakup sekitar 70% dari total panas terbuang industri global; (c) absennya analisis sensitivitas terhadap fluktuasi harga energi dan kebijakan *carbon pricing*; (d) langkanya kajian komparatif multi-teknologi dalam satu skenario industri yang sama; serta (e) ketiadaan kerangka TEA yang baku dan dapat direplikasi lintas studi.

**Keempat**, hasil kajian ini secara keseluruhan menegaskan bahwa potensi pemulihan energi dari panas terbuang di sektor industri manufaktur sangat besar dan layak secara ekonomi, namun implementasinya di negara berkembang seperti Indonesia masih sangat terbatas.[23] Hambatan finansial — terutama tingginya *capital expenditure* (CAPEX) dan keterbatasan akses pembiayaan bagi usaha kecil dan menengah — merupakan hambatan paling kritis yang belum terakomodasi secara memadai dalam literatur yang ada. Kondisi ini sekaligus membuka ruang penelitian yang luas dan relevan bagi pengembangan kerangka TEA yang kontekstual untuk industri manufaktur Indonesia.[24]

## 4.2 Saran

Berdasarkan kesimpulan dan kesenjangan penelitian yang telah diidentifikasi dari sintesis literatur, dikemukakan saran-saran strategis yang ditujukan kepada tiga kelompok sasaran utama:[25]

### 1. Bagi Peneliti, Akademisi, dan Institusi Pendidikan Teknik Mesin

- **Pengembangan Kurikulum dan Kompetensi Vokasional:** Hasil peta pengetahuan (*knowledge map*) dalam studi ini menunjukkan kompleksitas pemilihan teknologi WHR (seperti ORC, HE, TEG, dan ARS). Oleh karena itu, institusi pendidikan teknik mesin, khususnya Program Studi Pendidikan Teknik Mesin di lingkungan JPTK, disarankan untuk mengintegrasikan temuan studi ini ke dalam materi pengayaan mata kuliah Termodinamika Terapan, Perpindahan Panas, dan Manajemen Energi. Hal ini penting untuk membekali calon pendidik teknik dan lulusan vokasi dengan kompetensi analisis kelayakan tekno-ekonomi industri hijau yang nyata.
- **Fokus Penelitian Lanjutan Kontekstual:** Peneliti berikutnya disarankan untuk mengembangkan model simulasi TEA dinamis yang menggunakan parameter ekonomi lokal Indonesia (seperti variasi tarif listrik industri PLN, tingkat inflasi nasional, dan skenario *carbon pricing* domestik).
- **Optimasi Temperatur Rendah:** Mengingat data literatur menunjukkan bahwa 70% panas terbuang berada di bawah 150°C, penelitian masa depan perlu difokuskan pada optimasi sistem ORC bertemperatur rendah dan TEG permukaan menggunakan data primer dari industri manufaktur lokal di Indonesia (seperti industri pengolahan karet, makanan, atau pabrik semen) sebagai bentuk proyek tugas akhir mahasiswa S1 yang aplikatif dan berbiaya rendah.[26]

### 2. Bagi Pelaku Industri Manufaktur

- **Pelaksanaan Audit Energi Mandiri:** Pelaku industri manufaktur disarankan untuk memulai langkah pemulihan energi melalui pelaksanaan audit energi terstruktur dan pemetaan karakteristik termal (*waste heat mapping*) untuk mengetahui temperatur pasti gas buang sebelum memilih teknologi WHR.[27]

- **Adopsi Bertahap untuk UKM:** Mengingat tingginya biaya modal awal (CAPEX) sistem ORC skala besar menjadi hambatan utama bagi segmen industri menengah ke bawah, pelaku industri disarankan mengadopsi teknologi *heat exchanger* modular atau sistem ORC berkapasitas rendah (di bawah 500 kW) yang memiliki konfigurasi sistem lebih sederhana, risiko gangguan operasional minimal, dan masa pengembalian modal (*payback period*) yang relatif cepat.

### 3. Bagi Pembuat Kebijakan (Pemerintah)

- **Penyusunan Regulasi dan Insentif Fiskal:** Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) bersama Kementerian Perindustrian disarankan untuk merumuskan regulasi pendukung berupa insentif fiskal, seperti pemotongan pajak investasi teknologi hijau (*tax allowance*) atau kemudahan akses *green financing*, guna menurunkan beban CAPEX awal yang selama ini menahan laju implementasi teknologi WHR di sektor manufaktur nasional.
- **Integrasi Kebijakan Energi Nasional:** Pemerintah perlu memasukkan agenda pemulihan panas terbuang industri secara eksplisit ke dalam dokumen Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) dan Rencana Induk Pengembangan Industri Nasional (RIPIN) sebagai salah satu pilar strategi pencapaian target efisiensi energi dan penurunan emisi karbon sektor industri pengolahan Indonesia.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis, Ramadhan Syahputra, mengucapkan terima kasih kepada Universitas Al-Azhar Medan, khususnya Program Studi Teknik Mesin, atas dukungan akademik dan fasilitas yang diberikan selama proses penelitian ini berlangsung. Apresiasi yang sebesar-besarnya juga disampaikan kepada dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, masukan, dan koreksi yang sangat berarti dalam penyusunan artikel ini. Penulis juga berterima kasih kepada para reviewer dan editor Jurnal NOZEL atas waktu dan perhatian yang diberikan dalam proses penelaahan naskah ini. Tidak lupa, penulis menyampaikan rasa terima kasih kepada seluruh penulis dari literatur yang dirujuk dalam kajian ini, yang karya ilmiahnya menjadi fondasi utama dalam penyusunan tinjauan sistematis ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] International Energy Agency, “World Energy Outlook 2023,” Paris, France, 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- [2] K. Ebrahimi, G. F. Jones, and A. S. Fleischer, “Techno-Economic Analysis of Waste Heat Utilization in Data Centers: Application of Absorption Chiller Systems,” *Energies*, vol. 14, no. 9, p. 2433, 2021, doi: 10.3390/en14092433.
- [3] N. Lavoro, S. C. Costantini, and S. Environment, “Environment, human development and economic growth,” no. 35, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.05.011>.
- [4] M. J. Page *et al.*, “The {PRISMA} 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews,” *BMJ*, vol. 372, p. n71, 2021, doi: 10.1136/bmj.n71.
- [5] A. Yaman, A. Yoganingrum, Y. Yaniasih, and S. Riyanto, “TINJAUAN PUSTAKA SISTEMATIS PADA BASIS DATA PUSTAKA DIGITAL: TREN RISET, METODOLOGI, DAN COVERAGE FIELDS,” *Baca J. Dokumentasi Dan Inf.*, vol. 40, no. 1, p. 1, 2019, doi: 10.14203/j.baca.v40i1.481.
- [6] J. Popay, H. Roberts, and A. Sowden, “Guidance on the Conduct of Narrative Synthesis in Systematic Reviews,” *Accessed 22nd May*, no. April 2006, pp. 1–92, 2006, [Online]. Available: [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/39246301/02e7e5231e8f3a6183000000-libre.pdf?1445068016=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DGuidance\\_on\\_the\\_conduct\\_of\\_narrative\\_syn.pdf&Expires=1781126060&Signature=XYd4M38hafpBeTTIN3PMwAKKyurwuKaue-sLADOU3ppk339gOVVсна7F5wf5KkawI~1KDm4XPtDymbJaaJINB24CiKOq0F-Qex9iRW2R5ae9rWAmIXhiuEuvtdKSc1qFW1RKGCFnV6AKNBvz~FSLa~kyhpYtUke2meyFs7-JXki87CJ~DYkC6TkSa4bnPAHB-tF75zqtqu1q8uQKl0vEvTrz7BGFzr02bedlC1OPQ4iJxg-nRmUY8Lcch7rUisdKLpZ2ugZRPcN5YgJ3nzOsX4M0~JNcdjeS24nn8L8F1Vlnmvr8D-ESJXJ060RsMFLBigDiDGg2slYQfK~a47tjg\\_\\_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/39246301/02e7e5231e8f3a6183000000-libre.pdf?1445068016=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DGuidance_on_the_conduct_of_narrative_syn.pdf&Expires=1781126060&Signature=XYd4M38hafpBeTTIN3PMwAKKyurwuKaue-sLADOU3ppk339gOVVсна7F5wf5KkawI~1KDm4XPtDymbJaaJINB24CiKOq0F-Qex9iRW2R5ae9rWAmIXhiuEuvtdKSc1qFW1RKGCFnV6AKNBvz~FSLa~kyhpYtUke2meyFs7-JXki87CJ~DYkC6TkSa4bnPAHB-tF75zqtqu1q8uQKl0vEvTrz7BGFzr02bedlC1OPQ4iJxg-nRmUY8Lcch7rUisdKLpZ2ugZRPcN5YgJ3nzOsX4M0~JNcdjeS24nn8L8F1Vlnmvr8D-ESJXJ060RsMFLBigDiDGg2slYQfK~a47tjg__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA)
- [7] H. Jouhara, N. Khordehghah, S. Almahmoud, B. Delpech, A. Chauhan, and S. A. Tassou, “Waste heat recovery technologies and applications,” *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 6, no. January, pp. 268–289, 2018, doi: 10.1016/j.tsep.2018.04.017.
- [8] G. Pleßmann, M. Erdmann, M. Hlusiak, and C. Breyer, “Global energy storage demand for a 100% renewable electricity supply,” *Energy Procedia*, vol. 46, pp. 22–31, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.01.154.
- [9] A. Esteve *et al.*, “A global perspective on household size and composition, 1970–2020,” *Genus*, vol. 80, no. 1, 2024, doi: 10.1186/s41118-024-00211-6.
- [10] S. Mukherjee, A. Asthana, M. Howarth, and J. I. Chowdhury, “Techno-Economic Assessment of Waste Heat Recovery Technologies for the Food Processing Industry,” *Energies*, vol. 13, no. 23, p. 6446, 2020, doi: 10.3390/en13236446.
- [11] T. Tartière and M. Astolfi, “A World Overview of the Organic Rankine Cycle Market,” *Energy Procedia*, vol. 129, pp. 2–9, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.159.
- [12] S. Alibakhshi and others, “Optimizing Organic Rankine Cycle ({ORC}) configurations integrated with transient industrial waste heat: a multi-objective approach,” *Discov. Energy*, vol. 4, p. 1, 2024, doi: 10.1007/s43937-024-00053-5.

- [13] D. Xiao, P. Sun, J. Wu, and others, “Thermoelectric Generator Design and Characterization for Industrial Pipe Waste Heat Recovery,” *Processes*, vol. 11, no. 6, p. 1714, 2023, doi: 10.3390/pr11061714.
- [14] J. Rodrigo-Illari, M.-E. Rodrigo-Clavero, and E. Cassiraga, “Thermoelectric Generator Using Low-Cost Thermoelectric Modules for Low-Temperature Waste Heat Recovery,” *Sustainability*, vol. 15, no. 4, p. 3681, 2023, doi: 10.3390/su15043681.
- [15] P. Royo *et al.*, “Decision Support System of Innovative High-Temperature Latent Heat Storage for Waste Heat Recovery in the Energy-Intensive Industry,” *Energies*, vol. 14, no. 2, p. 365, 2021, doi: 10.3390/en14020365.
- [16] S. Quoilin, M. Van Den Broek, S. Declaye, P. Dewallef, and V. Lemort, “Techno-economic survey of organic rankine cycle (ORC) systems,” *Techno-economic Surv. Org. Rank. Cycle Syst.*, vol. 22, pp. 168–186, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.01.028.
- [17] P. Christodoulides, L. Aresti, G. P. Panayiotou, S. Tassou, and G. A. Florides, “Adoption of Waste Heat Recovery Technologies: Reviewing the Relevant Barriers and Recommendations on How to Overcome Them,” *Oper. Res. Forum*, vol. 3, no. 1, 2022, doi: 10.1007/s43069-021-00108-6.
- [18] H. Khairi, U. Islam, N. Sjech, and M. D. Djambek, “Strategi manajemen keuangan UMKM dalam meningkatkan akses pembiayaan dan keberlanjutan ekonomi di Indonesia: Sebuah Narrative Literature Review,” vol. 15, pp. 1–12, 2026, doi: <https://doi.org/10.20527/jbp.1515i1.112>.
- [19] S. R. Naqvi, B. Kazmi, S. A. Ammar Taqvi, W. H. Chen, and D. Juchelková, “Techno economic analysis for advanced methods of green hydrogen production,” *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.*, vol. 48, no. Figure 1, p. 100939, 2024, doi: 10.1016/j.cogsc.2024.100939.
- [20] M. Ghobakhloo, “The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0,” *J. Manuf. Technol. Manag.*, vol. 29, no. 6, pp. 910–936, 2018, doi: 10.1108/JMTM-02-2018-0057.
- [21] E. Gnansounou and A. Dauriat, “Techno-economic analysis of lignocellulosic ethanol: A review,” *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 13, pp. 4980–4991, 2010, doi: 10.1016/j.biortech.2010.02.009.
- [22] P. Sriksirin, S. Aphornratana, and S. Chungpaibulpatana, “A review of absorption refrigeration technologies,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 5, no. 4, pp. 343–372, 2000, doi: 10.1016/S1364-0321(01)00003-X.
- [23] D. P. van Soest and E. H. Bulte, “Does the energy-efficiency paradox exist? Technological progress and uncertainty,” *Environ. Resour. Econ.*, vol. 18, no. 1, pp. 101–112, 2001, doi: 10.1023/A:1011112406964.
- [24] E. Division, “Barriers to improvements in energy efficiency,” 1991, doi: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0301421591901155>.
- [25] Pemerintah Indonesia, “Peraturan Pemerintah No 33 Tahun 2023 tentang Konservasi Energi,” no. 167373, p. 40, 2023, [Online]. Available: <https://peraturan.bpk.go.id/Download/308697/PP Nomor 33 Tahun 2023.pdf>
- [26] M. S. Hochberg, V. Parsonnet, I. Gielchinsky, and S. Mansoor Hussain, “Coronary artery bypass grafting in patients with ejection fractions below forty percent. Early and late results in 466 patients,” *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.*, vol. 86, no. 4, pp. 519–527, 1983, doi: 10.1016/s0022-5223(19)39116-0.
- [27] D. Chiaroni, M. Chiesa, V. Chiesa, S. Franzò, F. Frattini, and G. Toletti, “Introducing a new perspective for the economic evaluation of industrial energy

efficiency technologies: An empirical analysis in Italy,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 15, pp. 1–10, 2016, doi: 10.1016/j.seta.2016.02.004.