

## Ekonomi Sirkular untuk Keberlanjutan Struktur Baja

### *Circular Economy for Sustainable Steel Structure*

Dian Laras Wati<sup>1\*</sup>, Oei Fuk Jin<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara  
Jl. Letjen S. Parman No.1, Jakarta 11440, Indonesia

\*Corresponding author: [watidianlaras@gmail.com](mailto:watidianlaras@gmail.com)

#### ABSTRAK

DOI:  
[10.30595/jrst.v9i2.24151](https://doi.org/10.30595/jrst.v9i2.24151)

#### Histori Artikel:

Diajukan:  
05/10/2024

Diterima:  
29/05/2025

Diterbitkan:  
08/09/2025

Konstruksi baja merupakan sektor industri dengan kontribusi besar terhadap emisi karbon dan konsumsi energi global. Dalam menghadapi isu keberlanjutan, penerapan prinsip ekonomi sirkular menjadi pendekatan yang menjanjikan untuk mengurangi limbah, memaksimalkan penggunaan kembali material, dan menurunkan dampak lingkungan. Studi ini menyajikan tinjauan sistematis terhadap 317 artikel dari database Scopus yang diterbitkan antara tahun 2010–2024. Pemilihan dilakukan dengan kriteria jurnal bereputasi (Q1–Q4), fokus pada struktur baja bangunan ramah lingkungan, serta aspek penggunaan kembali dan penilaian siklus hidup. Hasil analisis bibliometrik dan pemetaan kata kunci menggunakan VOSviewer menunjukkan bahwa topik penggunaan kembali struktur baja dan keberlanjutan belum tergarap secara terintegrasi. Praktik desain untuk dekonstruksi (DfD) ditemukan mampu menurunkan dampak emisi hingga 70% dibandingkan struktur baru, namun masih terbatas dalam penerapan karena kendala teknis dan ekonomi. Selain itu, pemanfaatan limbah industri seperti terak dan gas buang memiliki potensi besar dalam penghematan energi dan penurunan emisi CO<sub>2</sub>, namun belum diadopsi secara optimal. Temuan ini menekankan perlunya inovasi desain sambungan, integrasi teknologi, serta kebijakan insentif untuk mendukung ekonomi sirkular dalam konstruksi baja.

**Kata Kunci:** Struktur Baja; Ekonomi Sirkular; Penggunaan Kembali; Daur Ulang; LCA; Keberlanjutan

#### ABSTRACT

*Steel construction contributes significantly to global carbon emissions and energy consumption. In response to sustainability concerns, circular economy principles offer a promising approach to reducing waste, maximizing material reuse, and minimizing environmental impact. This study presents a systematic literature review of 317 Scopus-indexed articles published between 2010 and 2024. The selection focused on reputable journals (Q1–Q4), environmentally friendly steel structures, reuse, and life cycle assessment (LCA). Bibliometric and keyword mapping analysis using VOSviewer revealed that the topic of steel structure reuse and sustainability is still fragmented. Design for Deconstruction (DfD) practices were found to reduce emissions by up to 70% compared to new structures but face practical limitations due to technical and economic challenges. Moreover, the reuse of industrial by-products such as steel slag and blast furnace gas shows high potential for energy savings and CO<sub>2</sub> reduction, although adoption remains limited. These findings highlight the need for innovative joint design, technological integration, and policy incentives to advance circular economy implementation in steel construction.*

**Keywords:** Steel Structure; Circular Economy; Reuse; Recycling; LCA, Sustainability

## 1. PENDAHULUAN

Pembangunan dan industri konstruksi merupakan penyebab utama tingginya konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca di seluruh dunia (Munir et al., 2022). Dengan meningkatnya kesadaran akan perlunya mengurangi dampak perubahan iklim (Almulhim & Al Masmoum, 2024), sektor ini memiliki tanggung jawab untuk mengurangi jejak lingkungannya (Godinaud et al., 2024).

Salah satu aspek yang sangat berpengaruh terhadap lingkungan adalah penggunaan struktur baja (Zygomalas & Baniotopoulos, 2014). Proses produksi material baja sangat bergantung pada bahan bakar fosil seperti batu bara dan kokas, yang menyumbang sekitar 70% dari total energi yang dibutuhkan (Jaimes & Maroufi, 2020).

Meskipun baja dapat didaur ulang, metode ini tidak terhindar dari dampak ekologis yang signifikan karena membutuhkan penggunaan energi dan sumber daya yang besar (Malami et al., 2024). Dalam konteks ekonomi sirkular, yang mengedepankan perbaikan, penggunaan kembali, dan daur ulang, strategi utamanya adalah memaksimalkan pemanfaatan sumber daya yang ada (Kromoser et al., 2023).

Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan manfaat ekonomi dan lingkungan yang lebih besar, termasuk energi dan bahan mentah yang lebih efisien, mengurangi timbulnya limbah, mengurangi emisi CO<sub>2</sub> (Dragonetti et al., 2024), serta menjadikannya material yang berharga untuk konstruksi berkelanjutan (Cervantes Puma et al., 2024, Zhang et al., 2024, Balasbaneh et al., 2024)

Sebuah tinjauan mengenai keberlanjutan lingkungan dalam desain dan konstruksi baja mengungkapkan adanya perbedaan pandangan dan kesenjangan dalam pendekatan siklus hidup (Balasbaneh et al., 2024). Perubahan ini dipengaruhi oleh pemahaman yang semakin meningkat akan prinsip ekonomi sirkular dan pergeseran menuju praktik yang lebih ramah lingkungan (Balasbaneh et al., 2018).

Untuk memahami hal tersebut lebih lanjut, mengeksplorasi publikasi ilmiah, penulis, dan topik utama yang membahas aspek lingkungan dalam produksi dan penggunaan baja. Melalui analisis mendalam terhadap literatur yang dipilih, penelitian ini berusaha mengidentifikasi topik-topik yang relevan dan menarik terkait keberlanjutan lingkungan pada struktur baja.

Studi ini akan menyajikan temuan rinci berdasarkan indikator tinjauan sistematis.

Secara khusus, akan mengklasifikasi kata kunci yang diekstraksi dari artikel penelitian terpilih menggunakan VOSviewers untuk analisis konten yang mendalam. Akhirnya, dalam diskusi, penelitian ini akan menguraikan kesenjangan penelitian dan mengusulkan arah untuk studi masa depan dalam konteks ekonomi sirkular yang diterapkan pada struktur baja yang memiliki pengaruh signifikan terhadap keberlanjutan dalam industri konstruksi.

### 1.1 Ekonomi Sirkular Struktur Baja

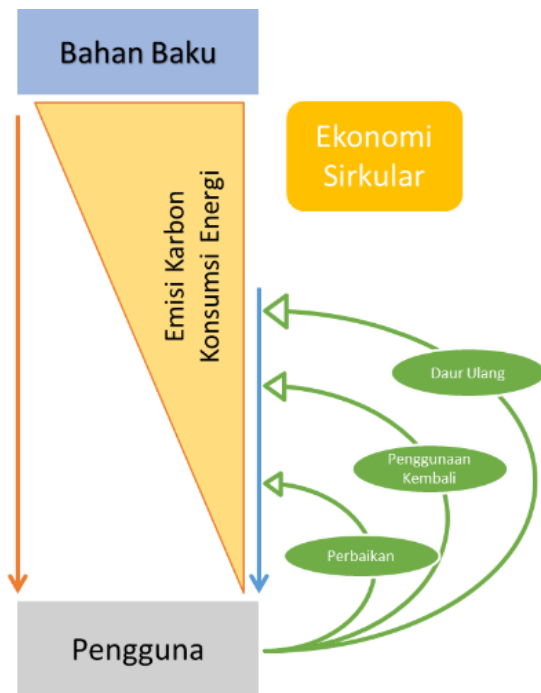
Ekonomi Sirkular adalah landasan produksi dan konsumsi ekonomi yang mendorong penggunaan sumber daya selama mungkin, meminimalkan limbah dan polusi, sekaligus menciptakan peluang pertumbuhan baru (Banjerdpai boon & Limleamthong, 2023). Target untuk meningkatkan daur ulang sampah menjadi 65% pada tahun 2030 dan mengurangi pembuangan sampah hingga maksimal 10% dari seluruh sampah pada tahun yang sama (Minunno et al., 2018).

Dengan berfokus pada pengelolaan dan daur ulang limbah, beberapa negara di Eropa telah menerapkan sistem pengelolaan limbah dan target daur ulang untuk meminimalkan penimbunan sampah dan meningkatkan penggunaan kembali material (Passoni et al., 2022).

Penerapan prinsip ekonomi sirkular pada struktur baja (**Gambar 1**), terutama yang masa pakainya kurang dari 50 tahun, menjadi sangat penting dalam mengurangi dampak lingkungan saat bangunan mencapai akhir masa pakainya (Balasbaneh et al., 2018, Banjerdpai boon & Limleamthong, 2023, Passoni et al., 2022). Ketika bangunan-bangunan tidak lagi berfungsi, maka perlu dilakukan pembongkaran, sehingga menghasilkan limbah dalam jumlah yang lebih besar, mencapai 30% hingga 50% dari total limbah industri di banyak negara (Nilimaa, 2023, Brutting et al., 2020).

Penggunaan kembali elemen struktur baja yang sudah digunakan dapat mengurangi dampak lingkungan hingga 56% lebih rendah dibandingkan dengan menggunakan elemen baru dari baja daur ulang (Brutting et al., 2020). Jika elemen bangunan digunakan kembali tiga kali atau lebih sesuai dengan desainnya (O'Grady et al., 2021), potensi pengurangan dampaknya mencapai rata-rata 60-70% (Eckelman et al., 2018), tergantung pada konfigurasi bangunan dan jenis dampak yang diukur.

Meskipun sekitar 91% struktur baja didaur ulang di Inggris, hanya 5% yang kembali digunakan (Eckelman et al., 2018).



**Gambar 1.** Skema Ekonomi Sirkular Struktur Baja (Cabaleiro et al., 2023)

Hal ini menunjukkan perlunya usaha lebih lanjut untuk meningkatkan penggunaan kembali struktur baja secara signifikan demi mendukung prinsip ekonomi sirkular secara efektif (MarSzouk & Elmaraghy, 2021). Dengan demikian, implementasi ekonomi sirkular pada struktur baja tidak hanya bertujuan untuk mengurangi limbah konstruksi dan pembongkaran, tetapi juga untuk memaksimalkan pemanfaatan kembali bahan-bahan bernilai guna serta mengurangi jejak lingkungan bangunan selama siklus hidupnya.

Langkah ini penting untuk mengurangi penggunaan bahan baru dan memperpanjang masa pakai material, yang pada akhirnya dapat mengurangi emisi karbon dan dampak lingkungan lainnya terkait dengan industri konstruksi.

## 2. METODE PENELITIAN

Tinjauan sistematis literatur dilakukan menggunakan alat *Publish or Perish* dengan database Scopus. Tujuan utamanya adalah untuk mengidentifikasi penelitian ilmiah, penulis, serta topik-topik yang berkaitan dengan keberlanjutan konstruksi baja. Proses identifikasi, penyaringan dan penilaian kualitas artikel penelitian. Pencarian artikel penelitian dengan mengikuti kode initial seperti pada **Tabel 1**.

Pencarian difokuskan pada artikel penelitian yang dipublikasikan dari tahun 2010 hingga 2024. Artikel yang diterbitkan oleh jurnal

terindeks scopus Q1-Q4. Pencarian artikel difokuskan dengan aspek keberlanjutan dengan penerapan ekonomi sirkular pada struktur baja bangunan ramah lingkungan. Dengan menggunakan kombinasi kata kunci "steel", "economic circular", "LCSA", "emission", "material flow", "deconstruction", dan "sustainability".

Jumlah artikel penelitian yang ditemukan dikelompokkan berdasarkan kelompok pencarian kata kunci seperti pada **Tabel 1**, didapatkan 317 artikel penelitian. Pemilihan artikel hanya pada artikel penelitian dan *review*, tidak memilih *conference paper* dan *Book Chapter* sehingga artikel penelitian yang terpilih menjadi 192. selanjutnya hasil pencarian dari beberapa kelompok kata kunci digabungkan dan dieliminasi untuk artikel penelitian yang terduplikasi.

Didapatkan sebanyak artikel penelitian. Pemilihan jurnal dengan penerbit jurnal seperti *Elsevier*, *American Society of Civil Engineers (ASCE)*, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*, *Taylor & Francis*, *Springer*, dan *CellPress*. Didapatkan sebanyak 132 artikel penelitian.

Kemudian penyaringan dilanjutkan dengan pemilihan artikel penelitian berdasarkan topik pembahasan keberlanjutan struktur baja dengan sistem ekonomi sirkular, dengan membaca judul dan abstrak didapatkan sebanyak 50 artikel penelitian dianggap memenuhi kriteria topik pembahasan dan sebanyak 82 artikel penelitian tidak sesuai dengan topik pembahasan.

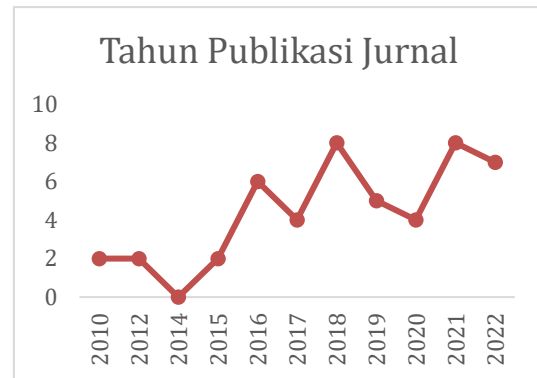
Pada **Gambar 2** menunjukkan jumlah jurnal yang digunakan berdasarkan tahun publikasinya. Dari grafik terlihat bahwa penelitian perihal topik ini banyak dilakukan pada tahun 2020, 2023, dan tahun 2024, hal ini menunjukkan perkembangan atas perhatiannya terhadap keberlanjutan lingkungan.

Kemudian, **Tabel 2** menunjukkan jumlah jurnal publikasi yang terindeks scopus Q1, sebagaimana diidentifikasi melalui database Scopus, yang menerbitkan makalah tentang kelestarian lingkungan, dampak lingkungan, dan aspek lingkungan terkait ekonomi sirkular dalam siklus hidup baja. Hasil tersebut diperoleh dari analisis artikel yang diidentifikasi selama penelitian dan mengacu pada karya yang diterbitkan antara tahun 2010 dan 2024.

Dari artikel yang sudah didapatkan maka dilakukan analisis kata kunci dengan VOSviewer dan analisis isi makalah sebagai hasil dari pembahasan dan diskusi dalam makalah ini. Kemudian, dilakukan analisis kata kunci dengan menggunakan VOSviewer.

**Tabel 1.** Kode initial analisis isi artikel penelitian

Kode	Deskripsi
Tahun publikasi	2010 - 2024
Nama jurnal	Jurnal terpublikasi Scopus
Indeks jurnal	Q1-Q4
Jenis bangunan	Bangunan ramah lingkungan
Jenis konstruksi	Struktur Baja
Aspek keberlanjutan	Ekonomi sirkular pada struktur baja



**Gambar 2.** Grafik Tahun Publikasi Jurnal

**Tabel 2.** Jurnal Publikasi yang digunakan

Nama Jurnal	Indeks Jurnal	Jumlah Jurnal
Buildings	Q1	8
Sustainability	Q1	7
Building Engineering	Q1	3
Journal of Cleaner Production	Q1	3
Energy & Buildings	Q1	3
Resources, Conservation & Recycling	Q1	2
Automation in Construction	Q1	2
Developments in the Built Environment	Q1	1
Energies	Q1	1
Engineering Structures	Q1	1
Geothermics	Q1	1
Green and sustainability chemistry	Q1	1
Heliyon	Q1	1
International Journal of Sustainable Engineering	Q1	1
Building and Environment	Q1	1
Journal of Construction Engineering & Management	Q1	1
Materials	Q1	1
Materials and Structures	Q1	1
Measurement	Q1	1
Metals	Q1	1
Nature Communication	Q1	1
Smart and Sustainable Built Environment	Q1	1
Structural Safety	Q1	1
Structure and Infrastructure Engineering	Q1	1
Ain Shams Engineering	Q1	1
Sustainable Production and Consumption	Q1	1
International Journal of Urban Sciences	Q1	1
Waste Management	Q1	1

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Analisis Kata Kunci

Analisis sistematis terhadap kata kunci suatu disiplin ilmu memberikan pemahaman yang lebih jelas tentang dinamika perkembangan dan kesenjangan dalam penelitian (Alaloul et al., 2021). Dengan menganalisis keterkaitan antara kejadian bersama, peran, dan tujuan dari komponen internal dalam suatu bidang akademik, kita dapat mendapatkan wawasan

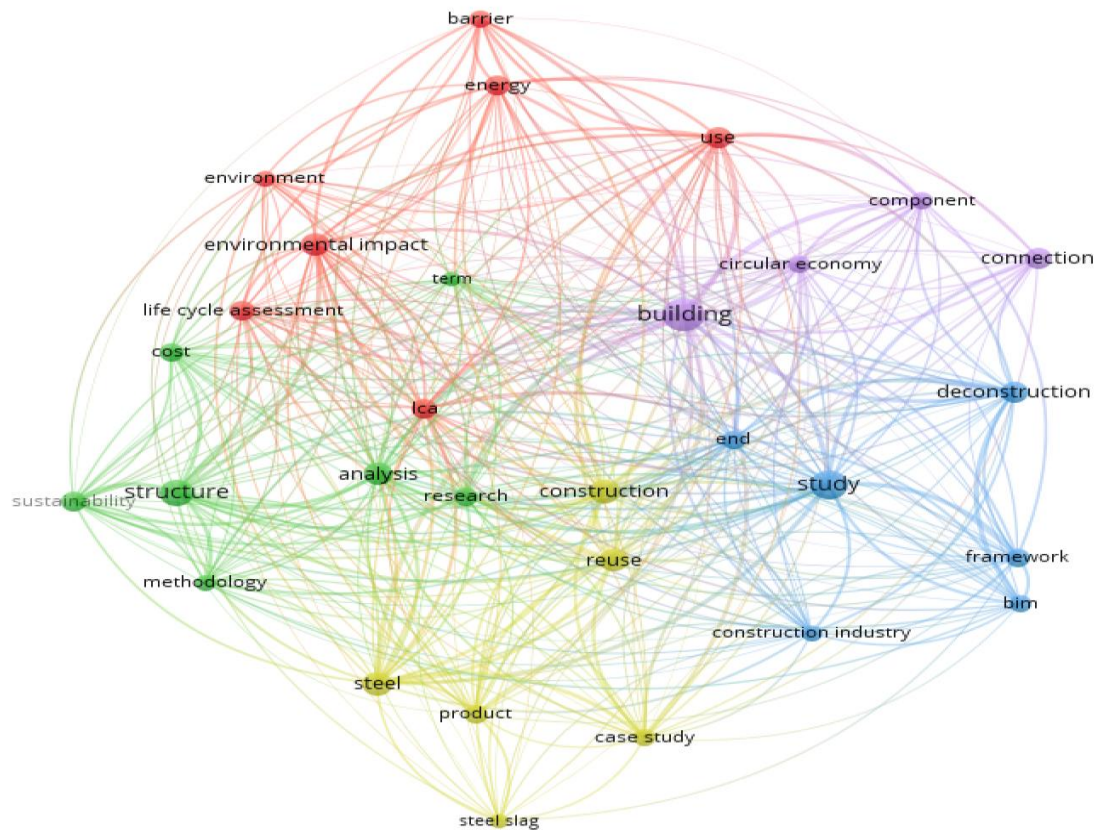
yang lebih mendalam dan mengungkap batasan-batasan dalam disiplin ilmu tersebut (Zhao et al., 2019).

Dalam proses analisis sistematis menggunakan aplikasi VOSviewer, sebuah peta berbasis kata kunci dibentuk dengan representatif sebuah lingkaran berwarna, sebagaimana ditampilkan dalam **Gambar 3** Frekuensi kemunculan kata kunci dianalisis

menggunakan metode evaluasi tingkat keberagaman.

Analisis ini bermanfaat untuk memahami seberapa merata atau beragamnya kontribusi dari item-item tertentu dalam

jaringan atau kumpulan data yang diamati (Alaloul et al., 2021). Hubungan antara item dalam peta ditentukan oleh tautan yang mencerminkan asosiasi atau keterkaitan diantara keduanya (Tetteh et al., 2023).



Gambar 3. Hasil analisis kata kunci menggunakan VOSviewer

Setiap tautan memiliki nilai yang disebut kekuatan tautan, dan diwakili oleh garis-garis yang menunjukkan tingkat hubungan antara kata kunci tersebut (Tetteh et al., 2023). Dimensi ukuran dan jarak antara garis-garis tersebut mencerminkan tingkat keberagaman penelitian yang telah dilakukan; semakin kecil dan lebih jauh jarak antara garis-garis tersebut menunjukkan bahwa elemen-elemen tersebut belum mendapat perhatian yang cukup dalam penelitian (Goh et al., 2023).

Hal ini menandakan adanya potensi untuk penelitian lanjutan guna mengisi kesenjangan pengetahuan yang teridentifikasi. Pada analisis ini terbentuk lima kelompok yang menunjukkan keterkaitan diantara kata kunci pada artikel penelitian yang sudah didapatkan. Kata kunci yang digunakan memiliki kemunculan sebagai berikut *Steel* sebanyak 33, *LCA* sebanyak 22, *Steel Slag* sebanyak 13, *Deconstruction*

sebanyak 25, *sustainability* sebanyak 22, *Circular Economic* sebanyak 18.

Terlihat pada Gambar 4 hubungan antara kata kunci yang digunakan dalam penelitian ini, menunjukkan bahwa keberlanjutan dengan penggunaan kembali belum memiliki garis hubungan secara langsung. Dengan demikian, dapat dikatakan sebagai kesenjangan dari penelitian yang sudah ada. Untuk itu, akan dilakukan pembahasan mendalam terkait penilaian siklus hidup berkelanjutan pada bangunan ramah lingkungan.

### 3.2 Penggunaan Kembali Struktur Baja (*Desain for Deconstruction*)

Penggunaan kembali atau dekonstruksi struktur baja dalam konteks ekonomi sirkular merupakan pendekatan yang penting dalam studi LCA (*Life Cycle Assessment*) (Akbarieh et al., 2020, Obi et al., 2021, Kanters, 2018) . Fokus

utamanya adalah pada desain awal bangunan dan strukturnya yang memfasilitasi penggunaan kembali komponen di masa depan, bukan hanya daur ulangnya (Cabaleiro et al., 2023).

Konsep Penggunaan kembali struktur baja mengacu pada penggunaan komponen seperti balok dan kolom dari bangunan yang dibongkar dengan menggabungkan ke dalam desain awal (Teo et al., 2020). Metodologi yang diusulkan menggunakan Building Information Model (BIM) untuk mengevaluasi strategi dekonstruksi yang berbeda berdasarkan biaya, penggunaan energi, dan jejak karbon (Akbarnezhad et al., 2014).

Perlu digaribawahi pentingnya mengatasi hambatan yang ada dalam sektor arsitektur, teknik, dan konstruksi untuk mempromosikan ekonomi sirkular, yaitu dengan Desain untuk Dekonstruksi (*Design for Deconstruction/DfD*) sebagai titik awalnya (Akbarnezhad et al., 2014). Bangunan yang didesain dengan penggunaan kembali material (DfD), memiliki dampak yang rendah 5 – 30% dibandingkan bangunan tradisional.

Apabila komponen digunakan maksimal 3 kali, akan memberikan dampak 60-70% lebih rendah (Nilimaa, 2023). Namun jika tidak ada penggunaan kembali, baik karena komponen rusak atau kurangnya insentif ekonomi, dan beberapa produk bangunan saat ini dirancang dengan cara yang sulit untuk dipisahkan (Vares et al., 2020), sehingga mempersulit proses penggunaan kembali.

Untuk itu ketahanan dan kemampuan beradaptasi komponen DfD akan menjadi faktor penentu keberlanjutannya (Balasbaneh et al., 2024). Di sisi lain, praktik penggunaan kembali struktur baja sering kali terbatas oleh konfigurasi ulang profil baja yang dibuat dengan tujuan spesifik (Nilimaa, 2023). Material yang

dirancang untuk digunakan kembali, hindari penggunaan sambungan permanen, seperti sambungan yang di las atau direkatkan (Pereiro et al., 2023).

Hal ini menyulitkan penggunaan ulang profil baja dalam struktur baru yang memiliki kebutuhan yang berbeda (Akhimien et al., 2021). Sebagai akibatnya, dalam banyak kasus, biaya untuk mengonfigurasi ulang struktur menjadi lebih mahal daripada membangun struktur baja baru (Sacks et al., 2010).

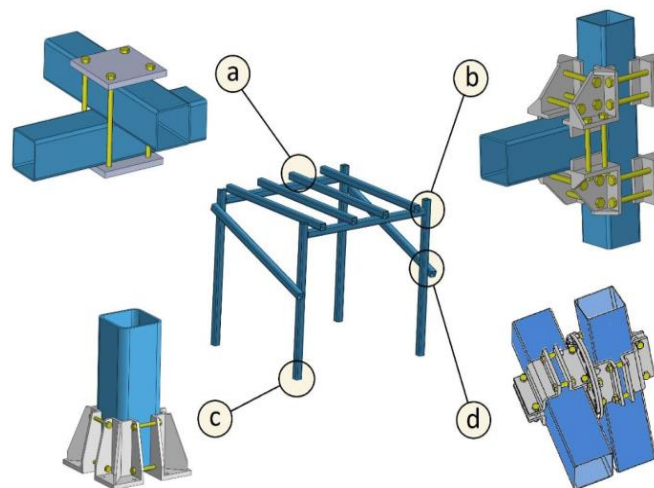
Akibatnya, dalam situasi di mana tata letak proses produksi berubah atau tidak memungkinkan untuk menggunakan kembali struktur yang ada tanpa modifikasi signifikan, sering kali dipilih untuk membuang struktur tersebut, meskipun struktur tersebut masih dapat berfungsi tanpa kerusakan yang signifikan.

Penggunaan kembali struktur baja dapat dilakukan dengan memperhatikan desain sambungan struktur baja. Sambungan yang dapat dilepas dan dikonfigurasi ulang, seperti sambungan perancah menggunakan kunci cakram dan sambungan dengan *quick round tube coupler* (Error! Reference source not found.), kekurangan sambungan ini hanya dapat digunakan pada perancah (Aye et al., 2012).

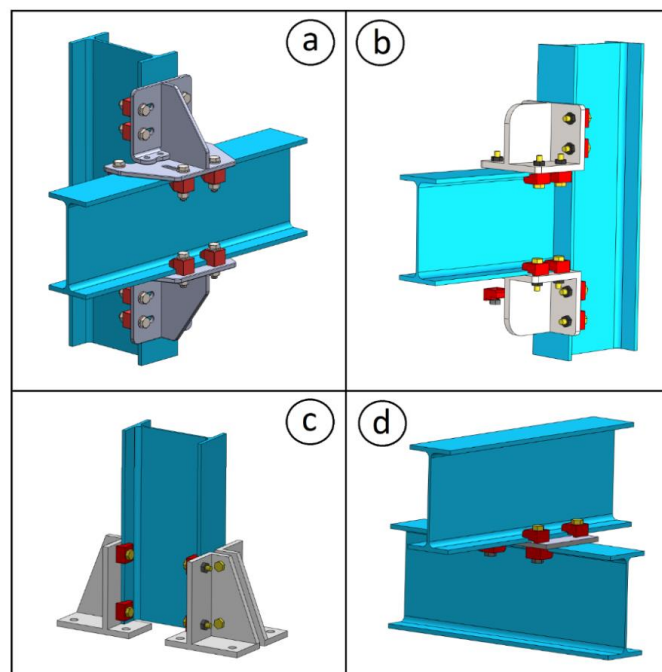
Kemudian, sambungan dengan klem untuk profil persegi panjang, jenis sambungan yang digunakan terdiri dari sambungan melintang antar balok, (b) sambungan balok ke kolom, (c) sistem alas lepasan untuk kolom berpenampang persegi atau persegi panjang, dan (d) sambungan lateral balok pada sembarang sudut (**Gambar 5**). Selain itu, sambungan koneksi, seperti (a) Sambungan lateral balok transversal pada sudut 90° ke sayap kolom, (b) sambungan balok ke kolom, (c) sistem alas lepasan untuk kolom berpenampang tipe I, dan (d) transversal sambungan balok (**Gambar 6**).



**Gambar 4.** Sambungan kunci cakram & quick round tube coupler (Cabaleiro et al., 2023)



Gambar 5. Sambungan klem (Cabaleiro et al., 2023)



Gambar 6. Sambungan koneksi (Cabaleiro et al., 2023)

### 3.3 Daur Ulang Limbah Produksi Baja

Dalam konsep ekonomi sirkular, daur ulang limbah pada industri pembuatan baja yaitu terak, memiliki peranan yang sangat penting. Sebuah studi telah mengidentifikasi beberapa alasan rendahnya penggunaan kembali terak baja, salah satunya adalah biaya ekonomi yang menjadi faktor pembatas dalam mengadopsi solusi teknis yang lebih berkelanjutan (Sun et al., 2022). Beberapa tinjauan juga mengkaji metode saat ini untuk mengubah terak panas menjadi bahan bernilai tambah (Li & Dai, 2018).

Pendekatan ini meliputi modifikasi kasar untuk mengubah sifat-sifat terak, dan modifikasi halus untuk menghasilkan produk

seperti keramik kaca dan pupuk, serta teknik untuk mendaur ulang logam berharga. Selain itu, daur ulang gas buang juga dipertimbangkan untuk mengurangi emisi polusi udara (Brutting et al., 2020). Strategi untuk meningkatkan sirkularitas dalam produksi industri, seperti yang ditunjukkan dalam studi kasus industri baja Eropa (Perpiñán et al., 2023), mencakup integrasi vertikal dan penggunaan kembali terak dalam proses pembuatan baja untuk mengurangi penggunaan bijih besi.

Dengan cara melibatkan penggunaan kembali baja end-of-life (EoL) sebagai alternatif untuk memproduksi baja baru, serta pemeliharaan dan perbaikan baja EoL melalui

perencanaan keusangan atau kontrol garansi. Salah satu metode potensial untuk mengurangi emisi CO<sub>2</sub> dalam proses pembuatan baja melibatkan tanur sembur oksigen dan kondisi kaya hidrogen (Vares et al., 2020).

Dalam konteks pembuatan baja terpadu, gas sisa dari berbagai tahap produksi bisa dijadikan bahan baku untuk sintesis metana dan metanol dengan memanfaatkan teknologi terkini yang dapat diintegrasikan dengan produksi dan pemrosesan hidrogen (Guo et al., 2018). Pendekatan daur ulang gas pada tanur sembur saat ini dapat mengurangi intensitas CO<sub>2</sub> hingga 65% dibandingkan dengan proses tradisional (Perpiñán et al., 2023).

Penggunaan kembali gas dari tanur sembur dapat memberikan penghematan energi sebesar 4,9 MJ/kg CO<sub>2</sub> (Sun et al., 2022). Strategi lain termasuk pengolahan limbah sisa; di Eropa, sebagian besar produk samping baja sudah didaur ulang hingga 95% (Guo et al., 2018). Pendekatan lain yang relevan adalah meningkatkan pengumpulan dan berbagi informasi untuk meningkatkan pemasaran skrap baja, dengan mempertimbangkan perbedaan dalam sifat kimia dan fisik sampah (Perpiñán et al., 2023).

Daur ulang bukanlah satu-satunya solusi sirkular bagi industri baja. Penggunaan kembali bisa menjadi sangat relevan dalam kasus terak (Fisher & Barron, 2019). Karena sifat fisik dan kimianya, terak dapat digunakan kembali dalam aplikasi di darat, seperti untuk agregat dalam semen; sebagai bahan untuk menaikkan pH tanah atau memperbaiki sifat fisik tanah lunak; dalam aplikasi berbasis kelautan seperti perbaikan dan penggantian terumbu karang, atau peningkatan pertumbuhan rumput laut dan fitoplankton; atau untuk memicu penyerapan metaloid dan H<sub>2</sub>S (Scheepens et al., 2016).

### 3.4 Siklus Hidup Struktur Baja

Penilaian siklus hidup (LCA), sebagai prosedur standar untuk mengukur aliran sumber daya dan potensi dampak yang dihasilkan melalui siklus hidupnya oleh transformasi sumber daya menjadi produk (Bawden et al., 2016). Misalnya, dalam kasus struktur baja, LCA dapat diintegrasikan dengan kerangka Building Information Mode (BIM), yang mendukung penilaian dekonstruksi (Hosseini & Rahnavard, 2020).

Di sisi lain, LCA dapat digunakan untuk menilai potensi dampak lingkungan dari siklus hidup baja. Dalam prosedur LCA, langkah-langkah utama mencakup pengumpulan data yang akurat dan pembuatan inventarisasi, yang

digunakan sebagai masukan dalam tahap analisis dampak berikutnya (LCIA). Rincian tentang kendala, saran metodologis, dan ketidakpastian data yang terkait dengan fase Inventarisasi Siklus Hidup (LCI) (Basta et al., 2020).

Efisiensi material merupakan parameter kunci dari perspektif ekonomi sirkular (Walker et al., 2018). Potensi risiko bagi industri baja dalam menghasilkan polutan udara termasuk gas rumah kaca (GRK) dan senyawa beracun sudah diketahui dengan baik (Girón et al., 2018). Sehubungan dengan hal ini, sebuah studi merinci aliran sumber daya dan kaitannya dengan emisi yang dihasilkan di industri baja Tiongkok (Hosseini & Rahnavard, 2020).

Studi lain mengidentifikasi keberadaan partikel kaya Ca, Fe, Mg, dan Si dalam berbagai aerosol di atmosfer yang dipancarkan dari pabrik baja; partikel berkarbon; partikel bulat yang kaya akan Al, Fe, dan Si; dan partikel aglomerat yang berasal dari proses konversi partikel gas, kemudian dipolimerisasi dengan mineral yang mudah menguap (Walker et al., 2018).

Sehubungan dengan emisi GRK, diperkirakan bahwa produksi baja mengkonsumsi rata-rata global sebesar 5,17 MWh energi per ton yang dihasilkan dan mengeluarkan 1,9 ton CO<sub>2</sub> per ton yang diproduksi (Bawden et al., 2016). Pengurangan dampak emisi gas rumah kaca pada industri baja dengan meningkatkan produksi dan daur ulang.

Rata-rata jejak karbon dari produksi baja mentah adalah 1,3 kg/CO<sub>2</sub>/kg, telah mengalami penurunan sebesar 40% sejak tahun 1960 (Vares et al., 2020). Jejak karbon suatu bangunan yang dibangun dengan struktur baja bekas bergantung pada tingkat yang dibutuhkan untuk perbaikan dan rekondisi elemen yang digunakan kembali. Ini sebagian besar dipengaruhi oleh kondisinya, desain sambungan, dan degradasi material, tetapi juga pada metode pemulihan komponen dari konstruksi lama.

Jika dilihat dari sudut pandang ekonomi, untuk penggunaan kembali struktur baja dapat menghasilkan penghematan lebih tinggi untuk kasus penggunaan kembali yang pertama, namun mengalami pengurangan nilai saat penggunaan kembali yang kedua, akan tetapi lebih besar jika dibandingkan dengan baja daur ulang. Hal ini disebabkan oleh perolehan kembali sisa daur ulang yang lebih tinggi (90%) pada akhir masa pakainya dibandingkan dengan kandungan daur ulang sebenarnya (20%).

Implementasi ekonomi sirkular pada struktur baja memiliki dampak positif dalam mengurangi limbah konstruksi dan

pembongkaran, serta memaksimalkan pemanfaatan kembali bahan-bahan bernilai guna. Namun, terdapat kesenjangan penelitian yang perlu mendapat perhatian lebih lanjut. Misalnya, masih terdapat keterbatasan dalam pemahaman mengenai efektivitas penggunaan kembali struktur baja dalam mengurangi emisi karbon dan dampak lingkungan lainnya selama siklus hidupnya.

Selain itu, perlu dilakukan penelitian lebih mendalam mengenai faktor-faktor ekonomi yang mempengaruhi adopsi solusi teknis yang lebih berkelanjutan dalam industri konstruksi baja. Selain itu, diskusi dari hasil penelitian juga menyoroti rendahnya penggunaan kembali terak baja dan faktor-faktor pembatas yang meliputi aspek biaya ekonomi.

Hal ini menunjukkan perlunya penelitian lebih lanjut untuk mengidentifikasi strategi ekonomi yang dapat mendorong adopsi solusi teknis yang lebih berkelanjutan dalam penggunaan kembali terak baja. Selain itu, perlu juga dilakukan penelitian mengenai metode yang lebih efektif dalam mengubah terak panas menjadi bahan bernilai tambah, serta potensi penggunaan ulang gas buang untuk mengurangi emisi polusi udara dalam proses pembuatan baja.

Dalam konteks keberlanjutan struktur baja, penelitian masa depan juga dapat difokuskan pada pengembangan teknologi yang dapat meningkatkan efisiensi penggunaan kembali gas dari tanur sembur dalam proses pembuatan baja. Selain itu, perlu juga dilakukan penelitian mengenai integrasi teknologi terkini untuk memanfaatkan gas sisa dari berbagai tahap produksi baja sebagai bahan baku untuk sintesis metana dan metanol.

Dengan demikian, penelitian lebih lanjut dalam bidang ini dapat memberikan kontribusi signifikan dalam mengurangi emisi CO<sub>2</sub> dan meningkatkan keberlanjutan industri konstruksi baja secara keseluruhan.

#### 4. SIMPULAN

Implementasi ekonomi sirkular pada konstruksi baja memiliki potensi besar untuk mengurangi limbah konstruksi, memaksimalkan pemanfaatan kembali bahan bernilai, dan mengurangi dampak lingkungan. Hasil analisis menunjukkan bahwa praktik penggunaan kembali elemen struktur baja, terutama jika dirancang dengan pendekatan desain untuk dekonstruksi, memberikan kontribusi signifikan dalam menurunkan emisi karbon dan konsumsi energi.

Kendati demikian, adopsi pendekatan ini masih menghadapi berbagai kendala, seperti

keterbatasan desain sambungan yang dapat dibongkar dan tantangan ekonomi dalam proses rekondisi elemen baja. Selain itu, pemanfaatan limbah industri seperti terak dan gas buang belum sepenuhnya dioptimalkan, padahal memiliki potensi besar dalam meningkatkan efisiensi energi dan menurunkan emisi polutan.

Diperlukan penguatan strategi teknis dan ekonomi untuk mendorong pemanfaatan material end-of-life secara lebih luas serta integrasi teknologi yang mendukung transisi menuju konstruksi baja yang lebih berkelanjutan. Temuan ini memberikan dasar yang kuat bagi pengembangan inovasi dan kebijakan dalam mendukung penerapan ekonomi sirkular di sektor konstruksi baja.

#### REFERENSI

- Akbarieh, A., Jayasinghe, L. B., Waldmann, D., & Teferle, F. N. (2020). BIM-based end-of-lifecycle decision making and digital deconstruction: Literature review. *Sustainability (Switzerland)*, *12*(7). <https://doi.org/10.3390/su12072670>
- Akbarnezhad, A., Ong, K. C. G., & Chandra, L. R. (2014). Economic and environmental assessment of deconstruction strategies using building information modeling. *Automation in Construction*, *37*, 131–144. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.017>
- Akhimien, N. G., Latif, E., & Hou, S. S. (2021). Application of circular economy principles in buildings: A systematic review. *Journal of Building Engineering*, *38*, 102041. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102041>
- Alaloul, W. S., Altaf, M., Musarat, M. A., Javed, M. F., & Mosavi, A. (2021). Systematic review of life cycle assessment and life cycle cost analysis for pavement and a case study. *Sustainability (Switzerland)*, *13*(8), 1–38. <https://doi.org/10.3390/su13084377>
- Almulhim, M. S. M., & Al Masmoum, M. W. (2024). Optimizing Concrete Grade for a Sustainable Structural Design in Saudi Arabia. *Buildings*, *14*(4). <https://doi.org/10.3390/buildings14040860>
- Aye, L., Ngo, T., Crawford, R. H., Gammampila, R., & Mendis, P. (2012). Life cycle greenhouse gas emissions and energy analysis of prefabricated reusable building modules. *Energy and Buildings*, *47*, 159–168.

- <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.049>
- Balasbaneh, A. T., Marsono, A. K. Bin, & Khaleghi, S. J. (2018). Sustainability choice of different hybrid timber structure for low medium cost single-story residential building: Environmental, economic and social assessment. *Journal of Building Engineering*, 20, 235–247. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.07.006>
- Balasbaneh, A. T., Sher, W., & Haziman Wan Ibrahim, M. (2024). Life cycle assessment and economic analysis of Reusable formwork materials considering the circular economy. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(4), 102585. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102585>
- Banjerdpai boon, A., & Limleamthong, P. (2023). Assessment of national circular economy performance using super-efficiency dual data envelopment analysis and Malmquist productivity index: Case study of 27 European countries. *Heliyon*, 9(6), e16584. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16584>
- Basta, A., Serror, M. H., & Marzouk, M. (2020). A BIM-based framework for quantitative assessment of steel structure deconstructability. *Automation in Construction*, 111(December 2019), 103064. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103064>
- Bawden, K. R., Williams, E. D., & Babbitt, C. W. (2016). Mapping product knowledge to life cycle inventory bounds: A case study of steel manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 113, 557–564. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.014>
- Brutting, J., Camille Vandervaeren, Gennaro Senatore, Niels De Temmerman, & Fivet, C. (2020). Environmental impact minimization of reticular structures made of reused and new elements through Life Cycle Assessment and Mixed-Integer Linear Programming. *Energy & Buildings*. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109827>
- Cabaleiro, M., Conde, B., González-Gaya, C., & Barros, B. (2023). Removable, Reconfigurable, and Sustainable Steel Structures: A State-of-the-Art Review of Clamp-Based Steel Connections. *Sustainability (Switzerland)*, 15(10). <https://doi.org/10.3390/su15107808>
- Cervantes Puma, G. C., Salles, A., Turk, J., Ungureanu, V., & Bragança, L. (2024). Utilisation of Reused Steel and Slag: Analysing the Circular Economy Benefits through Three Case Studies. *Buildings*, 14(4), 1–22. <https://doi.org/10.3390/buildings14040979>
- Dragonetti, L., Papadaki, D., Assimakopoulos, M., Ferrante, A., & Iannantuono, M. (2024). *in Buildings , a Case Study in Greece*. <http://dx.doi.org/10.3390/buildings14040942>
- Eckelman, M. J., Brown, C., Troup, L. N., Wang, L., Webster, M. D., & Hajjar, J. F. (2018). Life cycle energy and environmental benefits of novel design-for-deconstruction structural systems in steel buildings. *Building and Environment*, 143(April), 421–430. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.07.017>
- Fisher, L. V., & Barron, A. R. (2019). The recycling and reuse of steelmaking slags — A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 146(March), 244–255. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.010>
- Girón, D., Delgado, T., Ruiz, J., Cabalín, L. M., & Laserna, J. J. (2018). In-situ monitoring and characterization of airborne solid particles in the hostile environment of a steel industry using stand-off LIBS. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 115, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.09.046>
- Godinaud, J., Loubet, P., Gombert-Courvoisier, S., Pryet, A., Dupuy, A., & Larroque, F. (2024). Life Cycle Assessment of an Aquifer Thermal Energy Storage System: Influence of design parameters and comparison with conventional systems. *Geothermics*, 120(November 2023), 102996. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2024.102996>
- Goh, C. S., Su, F., & Rowlinson, S. (2023). Exploring

- Economic Impacts of Sustainable Construction Projects on Stakeholders: The Role of Integrated Project Delivery. *Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction*, 15(3), 1–9. <https://doi.org/10.1061/jladah.ladr-963>
- Guo, J., Bao, Y., & Wang, M. (2018). Steel slag in China: Treatment, recycling, and management. *Waste Management*, 78, 318–330. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.04.045>
- Hosseini, S. M., & Rahnavard, R. (2020). Numerical study of steel rigid collar connection affecting cyclic loading. *Engineering Structures*, 208(October 2019), 110314. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110314>
- Jaimes, W., & Maroufi, S. (2020). Sustainability in steelmaking. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 24, 42–47. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.01.002>
- Kanters, J. (2018). Design for deconstruction in the design process: State of the art. *Buildings*, 8(11). <https://doi.org/10.3390/buildings8110150>
- Kromoser, B., Butler, M., Hunger, M., Kimm, M., Kopf, F., Mechtcherine, V., Pressmair, N., & Traverso, M. (2023). Article of RILEM TC 292-MCC: life cycle assessment (LCA) of non-metallic reinforcement for reinforcing concrete: manufacturing, durability, dismantling, recycling and reuse: a review. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 56(7), 1–24. <https://doi.org/10.1617/s11527-023-02211-y>
- Li, Y., & Dai, W. Bin. (2018). Modifying hot slag and converting it into value-added materials: A review. *Journal of Cleaner Production*, 175, 176–189. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.171>
- Malami, S. I., Val, D. V., Suryanto, B., Salman, H. A., & Wang, X. H. (2024). Probabilistic approach to the sustainability assessment of reinforced concrete structures in conditions of climate change. *Structural Safety*, 107(December 2023), 102428. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2023.102428>
- Marzouk, M., & Elmaraghy, A. (2021). Design for deconstruction using integrated lean principles and bim approach. *Sustainability (Switzerland)*, 13(14), 1–19. <https://doi.org/10.3390/su13147856>
- Minunno, R., O'Grady, T., Morrison, G. M., Gruner, R. L., & Colling, M. (2018). Strategies for applying the circular economy to prefabricated buildings. *Buildings*, 8(9). <https://doi.org/10.3390/buildings8090125>
- Munir, Q., Afshariantorghabeh, S., & Kärki, T. (2022). Industrial Waste Pretreatment Approach for 3D Printing of Sustainable Building Materials. *Urban Science*, 6(3). <https://doi.org/10.3390/urbansci6030050>
- Nilimaa, J. (2023). Smart materials and technologies for sustainable concrete construction. *Developments in the Built Environment*, 15(May), 100177. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100177>
- O'Grady, T. M., Minunno, R., Chong, H. Y., & Morrison, G. M. (2021). Interconnections: An analysis of disassemblable building connection systems towards a circular economy. *Buildings*, 11(11), 1–19. <https://doi.org/10.3390/buildings11110535>
- Obi, L., Awuzie, B., Obi, C., Omotayo, T. S., Oke, A., & Osobajo, O. (2021). Bim for deconstruction: An interpretive structural model of factors influencing implementation. *Buildings*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/buildings11060227>
- Passoni, C., Palumbo, E., Pinho, R., & Marini, A. (2022). The LCT Challenge: Defining New Design Objectives to Increase the Sustainability of Building Retrofit Interventions. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 14, Issue 14). <https://doi.org/10.3390/su14148860>
- Pereiro, X., Cabaleiro, M., Conde, B., & Riveiro, B. (2023). BIM methodology for cost analysis, sustainability, and management of steel structures with reconfigurable joints for industrial structures. *Journal of Building Engineering*, 77(July).

- <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107443>
- Perpiñán, J., Bailera, M., Peña, B., Romeo, L. M., & Eveloy, V. (2023). High oxygen and SNG injection in blast furnace ironmaking with Power to Gas integration and CO2 recycling. *Journal of Cleaner Production*, 405, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137001>
- Sacks, R., Koskela, L., Dave, B. A., & Owen, R. (2010). Sacks2010.Pdf. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(9), 968–980.
- Scheepens, A. E., Vogtländer, J. G., & Brezet, J. C. (2016). Two life cycle assessment (LCA) based methods to analyse and design complex (regional) circular economy systems. Case: Making water tourism more sustainable. *Journal of Cleaner Production*, 114, 257–268. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.075>
- Sun, Y., Tian, S., Ciais, P., Zeng, Z., Meng, J., & Zhang, Z. (2022). Decarbonising the iron and steel sector for a 2 °C target using inherent waste streams. *Nature Communications*, 13(1), 2–9. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27770-y>
- Teo, P. Ter, Zakaria, S. K., Salleh, S. Z., Taib, M. A. A., Sharif, N. M., Seman, A. A., Mohamed, J. J., Yusoff, M., Yusoff, A. H., Mohamad, M., Masri, M. N., & Mamat, S. (2020). Assessment of electric arc furnace (EAF) steel slag waste's recycling options into value added green products: A review. *Metals*, 10(10), 1–21. <https://doi.org/10.3390/met10101347>
- Tetteh, M. O., Chan, A. P. C., Darko, A., & Nani, G. (2023). Factors affecting international construction joint ventures: a systematic literature review. *International Journal of Construction Management*, 23(1), 98–113. <https://doi.org/10.1080/15623599.2020.1850203>
- Vares, S., Hradil, P., Sansom, M., & Ungureanu, V. (2020). Economic potential and environmental impacts of reused steel structures. *Structure and Infrastructure Engineering*, 16(4), 750–761. <https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1662064>
- Walker, S., Coleman, N., Hodgson, P., Collins, N., & Brimacombe, L. (2018). Evaluating the environmental dimension of material efficiency strategies relating to the circular economy. *Sustainability (Switzerland)*, 10(3), 1–14. <https://doi.org/10.3390/su10030666>
- Zhang, X., Heeren, N., Bauer, C., Burgherr, P., McKenna, R., & Habert, G. (2024). The impacts of future sectoral change on the greenhouse gas emissions of construction materials for Swiss residential buildings. *Energy and Buildings*, 303(December 2023), 113824. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113824>
- Zhao, X., Zuo, J., Wu, G., & Huang, C. (2019). A bibliometric review of green building research 2000–2016. *Architectural Science Review*, 62(1), 74–88. <https://doi.org/10.1080/00038628.2018.1485548>
- Zygomalas, I., & Baniotopoulos, C. (2014). Life cycle assessment environmental data for structural steel construction in Greece. In *International Journal of Sustainable Engineering* (Vol. 7, Issue 1, pp. 13–23). Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1080/19397038.2012.756951>