

CARBON EMISSION ANALYSIS OF PT TOBA BARA SEJAHTERA (TBS) ENERGI UTAMA TBK BASED ON SUSTAINABILITY REPORT

Sri Suryaningsum^{1*}, Pandu Aryoseto², Ratih Sekar Ratnasari³, Bambang Mahendra Andhika⁴

^{1*}Magister Akuntansi, Fakultas Ekonomi dan Bisnis, UPN Veteran Yogyakarta, Indonesia

²Akuntansi, Fakultas Ekonomi dan Bisnis, UPN Veteran Yogyakarta, Indonesia

³Teknik Industri, FTI, UPN Veteran Yogyakarta, Indonesia

⁴Manajemen, Universitas Terbuka, Indonesia

srisuryaningsum@upnyk.ac.id^{1}, panduaryoseto24@gmail.com²,*

lratih.ratnasari@gmail.com³, bambangmahendraandhika@gmail.com⁴

**Corresponding author*

Received December 17, 2025; Revised September 27, 2026; Accepted October 1, 2026; Published October 3, 2026

ABSTRACT

This study analyzes carbon emissions of PT Toba Bara Sejahtera (TBS) Energi Utama Tbk during 2020-2022 as a case study of an energy company transitioning from fossil fuels to renewable energy. Using a descriptive qualitative approach with secondary data from sustainability reports, the research reveals a surge in GHG emissions from 230,135 tCO₂eq (2020) to 1,373,012.34 tCO₂eq (2022), a nearly six-fold increase driven by full operation of two 200 MW coal-fired power plants. Emission intensity rose from 1,125.8 to 1,920.8 tCO₂eq per million USD revenue. TBS's reporting practices align with GHG Protocol standards for Scope 1 and 2, but require improved methodological transparency and comprehensive Scope 3 disclosure. The study uncovers an energy transition paradox where long-term decarbonization commitments face short-term emission increases from existing fossil assets. The 2024 divestment of coal power plants is projected to reduce emissions by 85%, marking a transformative phase toward the 2030 carbon neutrality target. This research contributes to Indonesia's sustainability reporting literature and provides decarbonization strategy recommendations for transitioning energy companies.

Keywords: Carbon emissions, energy transition, decarbonization, sustainability reporting, GHG Protocol.

ABSTRAK

Penelitian ini menganalisis emisi karbon PT Toba Bara Sejahtera (TBS) Energi Utama Tbk periode 2020-2022 sebagai studi kasus perusahaan energi yang bertransisi dari fosil ke energi terbarukan. Menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif dengan data sekunder dari laporan keberlanjutan, penelitian menunjukkan lonjakan emisi GRK dari 230.135 tCO₂eq (2020) menjadi 1.373.012,34 tCO₂eq (2022), meningkat hampir enam kali lipat akibat operasionalisasi penuh dua PLTU batubara 200 MW. Intensitas emisi naik dari 1.125,8 menjadi 1.920,8 tCO₂eq per juta USD pendapatan. Praktik pelaporan TBS selaras dengan standar GHG Protocol untuk Scope 1 dan 2, namun memerlukan peningkatan transparansi metodologi dan kelengkapan Scope 3. Penelitian mengungkap paradoks transisi energi dimana komitmen dekarbonisasi jangka panjang berhadapan dengan kenaikan emisi jangka pendek dari aset fosil. Divestasi PLTU 2024 diproyeksikan menurunkan emisi hingga 85%, menandai fase transformatif menuju target netral karbon 2030. Penelitian memberikan kontribusi pada literatur sustainability reporting Indonesia dan rekomendasi strategi dekarbonisasi perusahaan energi.

Kata kunci: Emisi karbon, transisi energi, dekarbonisasi, laporan keberlanjutan, GHG Protocol.



This is an open access article under the [Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

PENDAHULUAN

Perubahan iklim akibat meningkatnya emisi gas rumah kaca (GRK) kini menjadi isu global yang semakin mendesak, sehingga transisi menuju karbon netral dipandang sebagai langkah strategis yang tidak bisa lagi ditunda. Dalam beberapa dekade terakhir, praktik pelaporan keberlanjutan mengalami perkembangan yang cukup pesat, seiring dengan meningkatnya perhatian para peneliti terhadap pelaporan emisi karbon (Bosi et al., 2022). Di sektor minyak dan gas, penyusunan laporan keberlanjutan telah dimulai sejak era 1990-an dan terus menunjukkan perkembangan dari waktu ke waktu (Hasan et al., 2024).

Emisi karbon merupakan pelepasan gas karbon dioksida (CO₂) yang dihasilkan dari berbagai aktivitas, seperti transportasi, proses industri, dan kegiatan operasional lain yang memberi dampak negatif terhadap lingkungan. Pengungkapan emisi karbon menjadi bentuk tanggung jawab perusahaan dalam aspek lingkungan, yang menunjukkan adanya pengawasan serta akuntabilitas kepada para pemangku kepentingan (Maharani, 2024). Temuan penelitian di Indonesia mengungkapkan bahwa tanggung jawab sosial perusahaan berhubungan positif dengan tingkat pengungkapan emisi, artinya semakin besar komitmen perusahaan terhadap tanggung jawab sosial, semakin luas pula informasi emisi yang disajikan (Maharani, 2024). Selain itu, *carbon emission disclosure* atau pelaporan emisi karbon juga dipandang sebagai bagian dari komitmen perusahaan dalam mendukung kebijakan pemerintah untuk menekan emisi serta mengurangi kerusakan lingkungan yang muncul akibat aktivitas produksi (Putri et al., 2022).

Pengungkapan karbon semakin menjadi perhatian dunia sejak lahirnya *Paris Agreement* pada tahun 2015. Kesepakatan ini menetapkan tujuan jangka panjang untuk menahan kenaikan suhu bumi tidak lebih dari 2°C di atas level pra-industri, dengan upaya tambahan agar peningkatannya dapat dibatasi hingga 1,5°C (Sadai et al., 2022). *Paris Agreement* dipandang sebagai tonggak penting dalam diplomasi multilateral karena berhasil menyeimbangkan antara tingkat ambisi dan pembedaan peran negara dalam menghadapi perubahan iklim (Rajamani, 2016). Kesepakatan tersebut memuat tujuan aspiratif, kewajiban mitigasi yang bersifat mengikat, mekanisme pemantauan yang ketat, serta bentuk diferensiasi yang lebih halus antara negara maju dan negara berkembang (Rajamani, 2016).

Indonesia termasuk dalam jajaran negara dengan emisi karbon terbesar di dunia dan telah menyatakan komitmennya untuk mencapai *Net Zero Emission* (NZE) pada tahun 2060, disertai penyesuaian kebijakan serta batasan yang diperlukan guna mendukung pencapaian tersebut (Fitriana et al., 2024). Upaya ini menuntut partisipasi nyata dari sektor swasta, khususnya industri yang banyak menggunakan energi. Dalam kerangka tersebut, keberadaan pelaporan keberlanjutan karbon yang mengikuti standar internasional menjadi semakin penting.

Sebagian besar penelitian *carbon emission disclosure* di Indonesia masih berfokus pada pengujian faktor-faktor yang memengaruhi tingkat pengungkapan pada perusahaan manufaktur, sementara kajian yang menganalisis dinamika perubahan emisi aktual pada perusahaan energi yang sedang menjalani transisi bisnis masih terbatas. Penelitian di

sektor energi (Klaaßen & Stoll (2021), Matthews *et al.*, (2008), Hazaea *et al.*, (2022)) pun lebih banyak berada pada tataran kebijakan makro dan belum mengevaluasi secara mendalam kesesuaian praktik pelaporan perusahaan dengan standar internasional seperti *GHG Protocol*, termasuk aspek Scope 3 dan transparansi metodologi. Selain itu, fenomena paradoks transisi energi ketika komitmen dekarbonisasi jangka panjang disertai peningkatan emisi jangka pendek akibat operasional aset fosil belum banyak dikaji dalam konteks perusahaan energi di Indonesia. Oleh karena itu, penelitian ini mengisi kesenjangan tersebut melalui analisis mendalam terhadap profil emisi, faktor operasional, dan kualitas pelaporan PT TBS Energi Utama Tbk dalam kerangka transisi energi.

Laporan Keberlanjutan PT TBS Energi Utama Tbk tahun 2020–2022 menyatakan bahwa roadmap PT TBS Energi Utama Tbk (TBS), sebagai perusahaan energi terpadu yang sedang melakukan transisi dari batubara menuju energi hijau, meluncurkan program “TBS2030” yang menetapkan target mencapai karbon netral pada tahun 2030. Namun, dalam masa peralihan ini, perusahaan menghadapi tantangan berupa meningkatnya emisi yang berasal dari operasi aset fosil yang masih berfungsi.

Protokol GRK membagi emisi ke dalam tiga kategori, yakni Scope 1 sebagai emisi langsung dari sumber yang dimiliki atau dikendalikan perusahaan, Scope 2 sebagai emisi tidak langsung yang timbul dari penggunaan listrik, panas, atau uap yang dibeli, serta Scope 3 yang mencakup berbagai emisi tidak langsung lain yang muncul sepanjang rantai nilai perusahaan. Klasifikasi ini menjadi acuan utama dalam proses pengukuran emisi. Namun, dalam praktiknya, proses pengukuran dan pelaporan emisi masih menghadapi sejumlah kendala. Berbagai kajian mengenai pelaporan keberlanjutan menegaskan kebutuhan untuk meningkatkan transparansi, keandalan, dan keterbandingan pada sistem pengukuran yang digunakan saat ini (Hazaea *et al.*, 2022). Selain itu, penelitian tentang studi kasus perusahaan energi di Indonesia yang tengah menjalani masa transisi juga masih terbatas.

Penelitian ini bertujuan mengkaji karakteristik dan pola perubahan emisi karbon TBS sepanjang 2020-2022, membandingkan sistem pelaporannya dengan standar internasional, menelusuri faktor-faktor yang memengaruhi dinamika emisinya, serta merumuskan rekomendasi untuk meningkatkan kualitas pelaporan dan arah strategi dekarbonisasi ke depan. Hasil studi ini diharapkan dapat memperkaya literatur terkait praktik pengungkapan emisi pada industri energi di Indonesia sekaligus menjadi acuan bagi perusahaan lain dengan karakteristik serupa dalam menyusun strategi dekarbonisasi.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif dengan menggabungkan data kualitatif dan kuantitatif deskriptif melalui metode studi kasus untuk meninjau emisi karbon PT TBS Energi Utama Tbk. Metode studi kasus dipilih karena memungkinkan peneliti menelusuri suatu fenomena kontemporer secara lebih mendalam dalam kondisi nyata dan dalam konteks kehidupan sebenarnya (Burns, 2017; Crowe *et al.*, 2011). Pendekatan ini memiliki kelebihan dalam penelitian eksploratif, sebab memberikan kesempatan untuk melihat berbagai faktor yang saling berinteraksi sehingga membentuk

karakteristik khas dari objek yang diteliti (Burns, 2017). Metode tersebut juga sejalan dengan arah penelitian terkait *sustainability reporting*, yang menekankan pentingnya pemahaman menyeluruh terhadap praktik pengungkapan dan dinamika internal organisasi.

Jenis dan Sumber Data

Penelitian ini menggunakan data sekunder yang diperoleh dari:

- 1) Laporan Keberlanjutan PT TBS Energi Utama Tbk tahun 2020–2022 yang disusun mengikuti standar GRI dan POJK No. 51/POJK.03/2017;
- 2) Laporan Tahunan pada periode yang sama sebagai bahan pendukung;
- 3) Literatur ilmiah dari *Scopus*, *Web of Science*, dan *Google Scholar* yang relevan dengan topik *carbon disclosure*, *sustainability reporting*, dan *GHG Protocol*.

Penggunaan laporan keberlanjutan tersebut sejalan dengan praktik penelitian yang menyediakan informasi yang tersusun secara sistematis mengenai kinerja lingkungan, sosial, dan tata kelola perusahaan Bosi et al., 2022;

Metode Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui metode dokumentasi dan analisis konten. Analisis konten sendiri merupakan teknik kualitatif yang banyak digunakan dan dapat diaplikasikan pada beragam bentuk data, baik teks, gambar, maupun audio (Kleinheksel et al., 2020). Metode ini lazim digunakan dalam penelitian terkait *sustainability reporting* dengan tiga pendekatan, yakni konvensional, terarah, dan sumatif (Hsieh & Shannon, 2005). Tahapan pengumpulan data mencakup:

- 1) Mengambil data emisi GRK (Scope 1 dan 2) untuk tahun 2020-2022;
- 2) Menghimpun data operasional seperti produksi batubara, output listrik PLTU, konsumsi energi, dan indikator keuangan;
- 3) Menelusuri literatur dengan kata kunci yang relevan;
- 4) Menggunakan *systematic literature review* untuk mengidentifikasi praktik terbaik yang berkaitan dengan topik penelitian.

Metode Analisis Data

Analisis Deskriptif Kuantitatif

Profil serta perubahan emisi dianalisis melalui perhitungan selisih absolut dan persentasenya, pengukuran intensitas emisi (Total Emisi/Pendapatan), serta penyusunan tabel yang diklasifikasikan berdasarkan masing-masing segmen operasional. Penggunaan indikator intensitas emisi sejalan dengan praktik *carbon accounting* yang umum dipakai untuk membandingkan kinerja antarperusahaan dan menelusuri pola keberlanjutan dalam aktivitas bisnis (Zhao et al., 2023).

Analisis Komparatif

Praktik pelaporan TBS dievaluasi dengan membandingkannya terhadap kerangka *GHG Protocol*, praktik unggulan yang dibahas dalam berbagai literatur, serta indikator

intensitas emisi sebagai tolok ukur. Pendekatan perbandingan seperti ini umum digunakan dalam menilai kualitas pengungkapan keberlanjutan guna memastikan aspek transparansi, keandalan, dan keterbandingan dalam sistem pengukuran (Hazaea et al., 2022).

Analisis Faktor-Faktor Penyebab

Identifikasi faktor dilakukan melalui analisis korelasi antara perubahan emisi dan kegiatan operasional, penerapan triangulasi data, serta penafsiran yang disesuaikan dengan konteks dan arah strategi bisnis. Pendekatan kualitatif tersebut menuntut peneliti untuk bersikap reflektif dalam menilai bagaimana konteks dan subjektivitas dapat memengaruhi jalannya penelitian (Olmos-Vega et al., 2023).

Systematic Literature Review

Penelitian ini berpedoman pada kerangka PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) untuk memastikan tinjauan sistematis disajikan secara transparan, akurat, dan lengkap (Liberati et al., 2009; Page et al., 2021). PRISMA memuat daftar periksa berisi 27 poin serta diagram alur empat tahap yang dianggap sebagai elemen penting dalam pelaporan *systematic review* (Liberati et al., 2009). Tahapan prosesnya meliputi:

- a) Menelusuri jurnal yang relevan melalui berbagai database akademik.
- b) Menyaring publikasi terbitan 2015-2024.
- c) Mengelompokkan artikel berdasarkan tema penelitian.
- d) Menyusun sintesis temuan untuk mengidentifikasi praktik terbaik dalam *carbon disclosure* dan *sustainability reporting*.

Pendekatan *systematic literature review* ini dinilai tepat karena perkembangan pengetahuan dalam riset bisnis berlangsung sangat cepat, namun tetap tersebar dan bersifat interdisipliner, sehingga tinjauan literatur menjadi semakin penting sebagai metode penelitian (Snyder, 2019).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Profil Emisi Karbon PT TBS Energi Utama Tbk (2020-2022)

Emisi karbon berkelanjutan memiliki korelasi strategis dengan penggunaan energi dan perubahan emisi, hal ini sesuai dengan kajian Acquaye et al., (2018). Berdasarkan analisis terhadap laporan keberlanjutan PT TBS Energi Utama Tbk, diperoleh data emisi karbon perusahaan selama periode 2020-2022 sebagaimana ditampilkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Emisi Gas Rumah Kaca PT TBS Energi Utama Tbk (2020-2022)

Tahun	Emisi GRK (tCO ₂ eq)	Penggunaan Energi (GJ)	Perubahan Emisi (%)
2020	230.135	236.802	-
2021	508.989,34	7.065.894	+121,2%
2022	1.373.012,34	11.753.308	+169,8%

Sumber: Laporan Keberlanjutan TBS 2022 (PT TBS Energi Utama Tbk., 2022)

Data pada Tabel 1 memperlihatkan lonjakan signifikan emisi karbon TBS sepanjang periode penelitian. Emisi GRK naik dari 230.135 tCO₂eq pada tahun 2020 menjadi 1.373.012,34 tCO₂eq pada tahun 2022, atau meningkat hampir enam kali lebih besar. Pola yang sama tampak pada konsumsi energi yang bertambah dari 236.802 GJ menjadi 11.753.308 GJ dalam kurun waktu tersebut.

Analisis Segmen Operasional

Tabel 2. Profil Operasional PT TBS Energi Utama Tbk Berdasarkan Segmen Bisnis

Segmen Bisnis	Parameter	2020	2021	2022
Batubara	Produksi (juta ton)	2,86	2,44	2,92
	Pendapatan (USD juta)	175,6	174,7	278,9
Batubara	Pendapatan (USD juta)	20,2	221,6	304,0
PLTU	Produksi (kWh)	-	260.263.800	828.850.000
	Kapasitas	-	200 MW	200 MW
	Pendapatan (USD juta)	-	61,9	47,1
Kelapa Sawit	Produksi CPO (kg)	7.407.010	5.356.299	6.357.780
	Pendapatan (USD juta)	4,5	4,6	5,6

Sumber: Laporan Keberlanjutan TBS 2022 (PT TBS Energi Utama Tbk., 2022)

Ada 3 segmen besar dalam strategi energi di PT TBS Energi Utama Tbk, yaitu batubara, PLTU, dan kelapa sawit. Tabel 2 menunjukkan bahwa PT TBS Energi Utama Tbk masih bergantung pada segmen batubara sebagai kontributor utama pendapatan, terutama didorong oleh kenaikan harga komoditas pada tahun 2022. Namun, perusahaan juga mengembangkan diversifikasi usaha melalui segmen pembangkit listrik dan kelapa sawit. Meskipun segmen PLTU menunjukkan peningkatan output secara signifikan, penurunan pendapatan mengindikasikan adanya tekanan pada harga atau struktur kontrak. Sementara itu, segmen kelapa sawit memberikan kontribusi yang relatif kecil namun stabil, sehingga berpotensi menjadi sumber pendapatan alternatif yang lebih defensif di masa depan.

Faktor Peningkatan Emisi Karbon

Analisis mendalam terhadap data operasional TBS mengungkapkan beberapa faktor kunci yang berkontribusi terhadap lonjakan emisi karbon:

Operasionalisasi Penuh PLTU (2021-2022)

Penyebab utama lonjakan emisi berasal dari beroperasinya secara penuh dua pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) berbasis batubara yang dimiliki anak usaha TBS, yaitu PT Gorontalo Listrik Perdana (GLP) dan PT Minahasa Cahaya Lestari (MCL), masing-masing berkapasitas 2x50 MW. Kedua PLTU tersebut mulai beroperasi pada 2021

dengan output listrik mencapai 260,26 juta kWh dan meningkat menjadi 828,85 juta kWh pada 2022 (kenaikan 218,5%).

PLTU berbahan bakar batubara merupakan kontributor emisi karbon yang sangat intensif di sektor energi. Mengacu pada temuan Acquaye et al., (2017), pembangkit listrik berbasis batubara dapat menghasilkan CO₂ sekitar 0,9–1,1 kg CO₂ per kWh, yang jauh lebih tinggi dibandingkan teknologi energi terbarukan. Dengan output listrik mencapai 828,85 juta kWh pada tahun 2022, estimasi emisi dari PLTU saja dapat berada pada kisaran 745.965–911.735 tCO₂, sehingga menyumbang bagian yang sangat besar terhadap total emisi TBS.

Peningkatan Aktivitas Pertambangan Batubara

Volume produksi batubara TBS bertambah dari 2,44 juta ton pada tahun 2021 menjadi 2,92 juta ton pada tahun 2022 (kenaikan 19,7%). Kegiatan penambangan batubara menimbulkan emisi yang bersumber dari pengoperasian alat berat, proses ekstraksi, serta aktivitas pengangkutan. Studi Abeydeera et al., (2019) mengungkapkan bahwa industri pertambangan batubara memberikan kontribusi besar terhadap emisi GRK melalui emisi langsung (Scope 1) yang berasal dari pemakaian bahan bakar diesel, serta emisi tidak langsung (Scope 2) yang muncul akibat penggunaan listrik.

Ekspansi Perdagangan Batubara

Pendapatan TBS dari aktivitas perdagangan batubara melonjak tajam dari USD 20,2 juta pada tahun 2020 menjadi USD 304,0 juta pada tahun 2022. Walaupun kegiatan perdagangan tidak menimbulkan emisi langsung sebesar operasi penambangan maupun PLTU, aktivitas ini tetap menyumbang emisi Scope 3 melalui proses transportasi dan kegiatan logistik yang menyertainya.

Perbandingan dengan Literatur dan Praktik Industri

Kerangka Pelaporan Emisi

Pelaporan emisi karbon TBS telah menggunakan kerangka kerja yang diakui di tingkat internasional. Penelitian menunjukkan bahwa transparansi pelaporan emisi, khususnya yang mencakup Scope 1, 2, dan 3, merupakan hal yang esensial untuk pemangku kepentingan eksternal dan dapat menghasilkan pengurangan emisi (Klaaßen & Stoll, 2021). Pada laporan keberlanjutan tahun 2022, TBS mengungkapkan emisi Scope 1 (emisi langsung dari kegiatan operasional) dan Scope 2 (emisi tidak langsung akibat penggunaan listrik), namun belum memberikan penjabaran yang menyeluruh mengenai emisi Scope 3. Aspek pelaporan scope 1, 2, dan 3 ini tercakup dalam tabel 3. Berikut adalah tabel 3 terkait Perbandingan Praktik Pelaporan Emisi TBS dengan Standar Internasional yang berisi aspek pelaporan, praktik perusahaan, standar GHG, dan kesenjangan.

Tabel 3. Perbandingan Praktik Pelaporan Emisi TBS dengan Standar Internasional

Aspek Pelaporan	Praktik TBS	Standar GHG Protocol	Kesenjangan
Scope 1 (Emisi Langsung)	✓ Dilaporkan	Wajib	Sudah sesuai
Scope 2 (Emisi tidak langsung - Listrik)	✓ Dilaporkan	Wajib	Sudah sesuai
Scope 3 (Emisi rantai nilai)	Belum komprehensif	Direkomendasikan	Perlu peningkatan
Metodologi Perhitungan	Tidak dijelaskan detail	Harus transparan	Perlu transparansi
Target Pengurangan	✓ Target 2030	Diperlukan	Sudah sesuai
Verifikasi Eksternal	Belum jelas	Direkomendasikan	Perlu verifikasi

Sumber: Analisis peneliti berdasarkan (Klaaßen & Stoll, 2021) dan laporan TBS (PT TBS Energi Utama Tbk., 2022)

Jika dibandingkan dengan praktik pelaporan emisi terbaik yang dibahas dalam berbagai literatur, TBS telah memperlihatkan komitmennya melalui pengungkapan emisi Scope 1 dan 2 serta penetapan target ambisius untuk mencapai netralitas karbon pada 2030. Meskipun demikian, masih terdapat peluang peningkatan terkait keterbukaan atas metode perhitungan yang digunakan dan pelaporan Scope 3 yang lebih lengkap serta menyeluruh.

Intensitas Emisi

Untuk membandingkan kinerja emisi TBS dengan perusahaan sejenis, dilakukan analisis intensitas emisi berdasarkan pendapatan. Tabel 4 terkait Intensitas Emisi Karbon PT TBS Energi Utama Tbk menyajikan intensitas emisi karbon PT TBS Energi Utama Tbk selama periode 2020–2022 yang dihitung berdasarkan perbandingan antara total emisi gas rumah kaca dengan pendapatan perusahaan. Pengukuran ini bertujuan untuk memberikan gambaran efisiensi emisi perusahaan dalam menghasilkan pendapatan, sehingga dapat digunakan sebagai indikator kinerja lingkungan yang lebih komprehensif dibandingkan hanya melihat total emisi secara absolut.

Melalui pendekatan intensitas emisi, analisis ini memungkinkan evaluasi yang lebih adil dalam membandingkan kinerja perusahaan dari waktu ke waktu, terutama dalam kondisi pertumbuhan usaha yang dinamis. Dengan demikian, tabel ini menjadi dasar penting untuk mengidentifikasi apakah peningkatan emisi sejalan dengan pertumbuhan ekonomi perusahaan atau justru menunjukkan penurunan efisiensi lingkungan.

Tabel 4. Intensitas Emisi Karbon PT TBS Energi Utama Tbk

Tahun	Total Emisi (tCO ₂ eq)	Pendapatan (USD juta)	Intensitas Emisi (tCO ₂ eq/USD juta)
2020	230.135	204,38	1.125,8
2021	508.989,34	442,46	1.150,3
2022	1.373.012,34	714,74	1.920,8

Sumber: Diolah dari Laporan Keberlanjutan TBS 2022 (PT TBS Energi Utama Tbk., 2022)

Data mengenai intensitas emisi memperlihatkan kecenderungan peningkatan, menandakan bahwa laju pertumbuhan emisi melampaui pertumbuhan pendapatan. Pada tahun 2022, intensitas emisi melonjak signifikan hingga mencapai 1.920,8 tCO₂eq per juta USD pendapatan, atau meningkat 67% dibandingkan tahun 2021. Kondisi ini terutama dipicu oleh beroperasinya PLTU batubara secara penuh.

Kajian Acquaye et al., (2018) mengenai evaluasi kinerja keberlanjutan dalam rantai pasok global mengungkap bahwa perusahaan energi di negara berkembang umumnya memiliki intensitas emisi pada kisaran 1.200–2.500 tCO₂eq per juta USD pendapatan, bergantung pada struktur sumber energi yang digunakan. Intensitas emisi TBS pada tahun 2022 termasuk dalam rentang tersebut, tetapi berada pada sisi atas spektrum, mencerminkan kuatnya dominasi energi fosil dalam portofolio usahanya.

Strategi Dekarbonisasi dan Tantangan Transisi Energi

Komitmen TBS2030

TBS telah memperkenalkan inisiatif “*Towards a Better Society 2030*” yang menargetkan tercapainya kondisi netral karbon pada tahun 2030. Upaya dekarbonisasi TBS meliputi:

- Divestasi Aset Batubara: Tahapan penghentian operasional bisnis batubara secara bertahap hingga 2030
- Pengembangan Energi Terbarukan: Penanaman investasi pada PLTS terapung, PLTB, PLTM, serta proyek berbasis biomassa
- Ekosistem Kendaraan Listrik: Kerja sama joint venture dengan GoTo Group melalui *Electrum*
- Konservasi Hutan: Keterlibatan aktif dalam mekanisme pasar karbon.

PT TBS Energi Utama Tbk memiliki komitmen transisi energi dan pengurangan ketergantungan terhadap energi fosil. PT TBS Energi Utama Tbk mengembangkan portofolio energi terbarukan yang terdiversifikasi. Pengembangan ini dilaksanakan dengan strategi yang mencakup berbagai jenis proyek, mulai dari pembangkit listrik tenaga minihidro, bayu, surya, hingga biomassa yang tersebar di beberapa wilayah Indonesia. Pengembangan ini mencerminkan arah transformasi bisnis perusahaan dan upaya menciptakan nilai jangka panjang yang berkelanjutan. Dalam tabel 5 berikut menyajikan rincian portofolio proyek energi terbarukan yang sedang dan akan dikembangkan oleh perusahaan, termasuk lokasi, kapasitas, status pengembangan, serta target Commercial Operation Date (COD). Informasi ini memberikan gambaran mengenai progres dan arah strategis perusahaan dalam memperkuat kontribusinya terhadap bauran energi bersih nasional.

Tabel 5. Portofolio Energi Terbarukan PT TBS Energi Utama Tbk

Jenis Proyek	Lokasi	Kapasitas	Status	Target COD
PLTM (Minihidro)	Lampung	6 MW	Konstruksi	2023
PLTB (Bayu)	Nusa Tenggara Timur	>50 MW	Pengembangan	2024-2025

PLTS Terapung	Batam	TBA	Pengembangan	2025
Biomassa	Multi-lokasi	TBA	Studi	2024-2026
Total Target	-	>100 MW	-	2025-2030

Sumber: Laporan Keberlanjutan TBS 2022 (PT TBS Energi Utama Tbk., 2022)

Analisis Transisi Energi

Hasil analisis terhadap data TBS menunjukkan adanya paradoks yang umum dijumpai pada perusahaan energi yang sedang menjalani proses transisi. Di satu pihak, perusahaan telah menetapkan komitmen jangka panjang menuju dekarbonisasi. Namun di pihak lain, dalam periode jangka pendek, tingkat emisi justru melonjak tajam akibat beroperasinya aset-aset berbasis fosil yang masih dimiliki. Keterlibatan dalam pasar karbon juga menjadi bagian dari dinamika tersebut.

Fenomena yang sama juga ditemukan dalam berbagai kajian akademik. Siagian et al., (2023) menemukan bahwa kebijakan energi Indonesia belum konsisten untuk mencapai transisi energi dan masih bergantung pada batu bara, dimana PLTU batu bara masih mendominasi bauran energi dalam pemenuhan kebutuhan energi Indonesia. Kondisi ini diperparah dengan mekanisme kontrak *Take or Pay* yang mengharuskan PLN menyerap listrik yang dipasok oleh *independent power producer* (IPP) dengan jumlah yang telah disepakati sebelumnya, sehingga menciptakan kelebihan pasokan yang dapat mempengaruhi kondisi keuangan PLN. Kondisi ini muncul karena beberapa faktor:

1. Keberadaan kontrak jangka panjang PLTU dengan PLN selama 25 tahun yang tidak mudah dihentikan
2. Kebutuhan arus kas dari bisnis yang telah berjalan untuk membiayai pengembangan energi terbarukan
3. Jangka waktu pembangunan infrastruktur energi terbarukan yang membutuhkan proses cukup panjang.

Analisis Proyeksi Pengurangan Emisi

Berdasarkan keterangan yang diperoleh dari sejumlah sumber, TBS telah menyelesaikan proses divestasi PLTU pada tahun 2024 yang diproyeksikan mampu menurunkan emisi hingga sekitar 85%. Tindakan ini menjadi langkah perubahan yang signifikan serta konsisten dengan sasaran perusahaan untuk mencapai karbon netral pada tahun 2030.

Tabel 6. Proyeksi Penurunan Emisi TBS Pasca-Divestasi PLTU

Skenario	Emisi 2022 (tCO ₂ eq)	Reduksi PLTU (85%)	Emisi Tersisa (tCO ₂ eq)	Penurunan (%)
Baseline	1.373.012,34	1.167.060,49	205.951,85	85,0%
+ Energi Terbarukan	1.373.012,34	1.167.060,49	102.975,93	92,5%
+ Efisiensi Operasional	1.373.012,34	1.167.060,49	61.785,56	95,5%

Catatan: Proyeksi berdasarkan asumsi peneliti dan target TBS2030

Dari tabel 6 terkait proyeksi penurunan emisi pasca divestasi PLTU, didapatkan bahwa hasil proyeksi menunjukkan bahwa divestasi PLTU berkontribusi dominan terhadap penurunan emisi sebesar 85%. Namun demikian, integrasi energi terbarukan dan peningkatan efisiensi operasional terbukti mampu meningkatkan tingkat penurunan emisi secara signifikan hingga mencapai 95,5%. Hal ini mengindikasikan bahwa strategi dekarbonisasi yang bersifat komprehensif dan terintegrasi lebih efektif dibandingkan pendekatan tunggal dalam mendukung pencapaian target net zero emission.

Implikasi Kebijakan dan Rekomendasi

Implikasi Regulasi

Kebijakan pemerintah Indonesia mengenai percepatan transisi energi serta pencapaian NZE 2060 memberikan dorongan positif bagi proses transformasi TBS. Meskipun demikian, masih dibutuhkan dukungan kebijakan tambahan berupa:

1. Insentif fiskal yang memungkinkan percepatan penghentian operasional PLTU batubara,
2. *Feed-in tariff* yang lebih menarik untuk mendorong investasi energi terbarukan.
3. Kerangka regulasi yang tegas guna memastikan kepastian dalam pelaksanaan pasar karbon.

Rekomendasi Perbaikan Pelaporan

Berdasarkan hasil kajian literatur mengenai praktik pelaporan emisi karbon dan keberlanjutan, terdapat beberapa rekomendasi yang dapat diterapkan untuk meningkatkan kualitas pelaporan emisi TBS:

Kejelasan Metodologi

Menambahkan penjelasan yang lebih lengkap mengenai metode perhitungan emisi, jenis faktor emisi yang digunakan, serta batasan organisasi yang ditetapkan menjadi penting. Penelitian di Indonesia menunjukkan bahwa tingkat pengungkapan emisi karbon dipengaruhi oleh sejumlah variabel, seperti ukuran perusahaan, tingkat profitabilitas, dan komitmen terhadap tanggung jawab sosial (Maharani, 2024). Kejelasan terkait metodologi sangat diperlukan karena organisasi yang menerapkan protokol dengan cakupan sempit cenderung menghasilkan estimasi emisi yang jauh lebih rendah dari kondisi sebenarnya (Matthews et al., 2008).

Pelaporan Scope 3 yang Lebih Lengkap

Menghitung emisi dari seluruh rantai nilai, baik pada tahap hulu maupun hilir, termasuk jejak karbon yang timbul dari penjualan produk batubara, menjadi langkah penting. Penelitian menunjukkan bahwa emisi langsung suatu industri hanya mencakup sekitar 14% dari total emisi dalam keseluruhan rantai pasok (Matthews et al., 2008). Tanpa gambaran yang menyeluruh mengenai jejak karbonnya, perusahaan akan kesulitan menentukan strategi mitigasi yang paling efisien dan hemat biaya.

Verifikasi oleh Pihak Eksternal

Melibatkan pihak independen untuk melakukan verifikasi data emisi dapat membantu meningkatkan keandalan laporan. Di Indonesia tersedia berbagai lembaga sertifikasi, baik yang fokus pada sistem maupun produk, yang berfungsi memberikan jaminan mutu sesuai standar yang berlaku (Isharyadi & Kristiningrum, 2021). Pemberian assurance terhadap laporan keberlanjutan menjadi aspek penting karena mampu memperkuat kredibilitas laporan serta citra perusahaan (Hazaea et al., 2022).

Rincian Emisi per Unit Usaha

Menyajikan kontribusi emisi secara terpisah untuk setiap unit usaha seperti pertambangan, PLTU, dan perkebunan menjadi langkah penting. Penelitian menunjukkan bahwa pengungkapan emisi karbon memiliki pengaruh positif yang signifikan terhadap nilai perusahaan, sehingga *Carbon Emission Disclosure* (CED) dapat dimanfaatkan sebagai sinyal untuk meningkatkan nilai perusahaan (Rahmanita, 2020). Pemisahan emisi menurut segmen operasional juga membantu mengidentifikasi sumber emisi terbesar dan memungkinkan penerapan strategi mitigasi yang lebih tepat sasaran.

Penetapan Target Tahap Menengah

Menetapkan sasaran penurunan emisi jangka menengah, misalnya untuk tahun 2025 dan 2027, dapat menjadi tonggak penting menuju target netral karbon pada 2030. Dalam konteks Indonesia, keberhasilan mencapai *Net Zero Emission* membutuhkan pengoptimalan bauran pembangkit listrik dengan tetap memperhatikan berbagai keterbatasan serta penyesuaian kebijakan yang diperlukan (Fitriana et al., 2024). Adanya target antara membantu perusahaan memantau perkembangan secara berkala dan menyesuaikan strategi dekarbonisasi bila diperlukan.

Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini menghadapi sejumlah batasan:

1. Data emisi hanya mencakup periode 2020-2022, sehingga pola jangka panjang belum dapat dievaluasi secara memadai.
2. Tidak tersedia rincian emisi berdasarkan tiap segmen bisnis secara mendalam, sehingga analisis spesifik per unit usaha menjadi terbatas.
3. Penjelasan mengenai metodologi penghitungan emisi tidak dipaparkan secara lengkap dalam laporan keberlanjutan, sehingga proses verifikasi sulit dilakukan.
4. Perbandingan dengan perusahaan serupa di Indonesia masih minim akibat keterbatasan data publik yang dapat diakses secara luas.

Penguatan Temuan Berdasarkan Literatur Transisi Energi

Lonjakan emisi karbon yang terjadi pada periode 2020-2022 akibat operasional penuh PLTU batubara menunjukkan dinamika yang sejalan dengan literatur transisi energi di negara berkembang. Penelitian Siagian *et al.*, (2023) menegaskan bahwa bauran energi Indonesia masih didominasi oleh batu bara, sehingga proses transisi menuju energi

terbarukan berlangsung secara bertahap dan tidak terlepas dari kontrak jangka panjang serta kebutuhan stabilitas sistem kelistrikan. Kondisi tersebut menyebabkan perusahaan energi yang sedang bertransformasi tetap bergantung pada aset fosil dalam jangka pendek. Selain itu, Fitriana *et al.*, (2024) menyatakan bahwa pencapaian jalur *Net Zero Emission* membutuhkan optimasi bauran pembangkit yang mempertimbangkan keterbatasan teknis dan ekonomi. Temuan penelitian ini memperkuat pandangan bahwa peningkatan emisi dalam fase awal transisi bukan merupakan anomali, melainkan bagian dari proses struktural menuju dekarbonisasi jangka panjang.

Analisis Berdasarkan Literatur Pelaporan Emisi

Evaluasi terhadap praktik pelaporan TBS yang telah mencakup Scope 1 dan Scope 2 namun belum komprehensif pada Scope 3 juga konsisten dengan berbagai kajian mengenai tantangan harmonisasi pelaporan karbon. Klaaßen & Stoll (2021) menekankan pentingnya keseragaman metodologi dan batasan organisasi dalam menghitung jejak karbon perusahaan agar tercipta keterbandingan lintas entitas. Matthews *et al.*, (2008) juga menunjukkan bahwa batasan perhitungan yang terlalu sempit dapat menghasilkan estimasi emisi yang jauh lebih rendah dari kondisi aktual, terutama apabila Scope 3 tidak dihitung secara menyeluruh. Lebih lanjut, Hazaea *et al.*, (2022) menegaskan bahwa assurance eksternal terhadap laporan keberlanjutan berperan penting dalam meningkatkan kredibilitas informasi lingkungan. Dengan demikian, hasil penelitian ini memperkuat literatur yang menekankan urgensi transparansi metodologi, kelengkapan Scope 3, serta verifikasi independen dalam sustainability reporting.

Kebaruan Penelitian

Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi antara analisis kuantitatif perubahan emisi aktual, evaluasi kualitas pelaporan berbasis standar internasional, dan interpretasi strategis dalam kerangka transisi energi perusahaan. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang lebih banyak menguji *determinan carbon emission disclosure* pada perusahaan manufaktur (Maharani, 2024; Putri *et al.*, 2022) studi ini menghadirkan pendekatan studi kasus mendalam pada perusahaan energi yang sedang melakukan transformasi portofolio bisnis. Penelitian ini juga mengidentifikasi secara empiris fenomena paradoks transisi energi, yaitu kondisi ketika komitmen netral karbon jangka panjang berjalan beriringan dengan peningkatan emisi jangka pendek akibat operasional aset fosil. Pendekatan integratif ini memberikan kontribusi konseptual dalam menjembatani literatur *carbon disclosure* dan dinamika strategi transisi energi di tingkat perusahaan.

Kebermanfaatan Global Penelitian

Secara global, penelitian ini memberikan kontribusi terhadap pemahaman mengenai tantangan implementasi dekarbonisasi di sektor energi, khususnya di negara berkembang yang masih memiliki ketergantungan tinggi terhadap batu bara. Rajamani (2016) menjelaskan bahwa *Paris Agreement* menuntut ambisi mitigasi yang progresif,

namun tetap mempertimbangkan diferensiasi kapasitas masing-masing negara. Dalam konteks tersebut, studi ini memberikan gambaran empiris mengenai bagaimana perusahaan energi merespons tekanan global menuju netral karbon melalui strategi divestasi aset fosil dan pengembangan energi terbarukan. Selain memperkaya literatur nasional, penelitian ini juga relevan bagi investor, regulator, dan lembaga internasional dalam merumuskan kebijakan transisi yang lebih realistis, berbasis data perusahaan, serta selaras dengan prinsip transparansi dan akuntabilitas pelaporan keberlanjutan, sesuai Klaaßen & Stoll (2021), Matthews et al. (2008), dan Hazaea et al. (2022).

KESIMPULAN

Analisis terhadap emisi karbon PT TBS Energi Utama Tbk selama 2020–2022 menunjukkan lonjakan besar emisi GRK dari 230.135 tCO₂eq menjadi 1.373.012,34 tCO₂eq, yang terutama dipicu oleh beroperasinya secara penuh dua PLTU batubara berdaya 200 MW yang mencerminkan kompleksitas dinamika transisi energi perusahaan. Meskipun pelaporan emisi Scope 1 dan Scope 2 telah selaras dengan standar internasional, peningkatan kejelasan metodologi serta transparansi emisi Scope 3 masih diperlukan. Dengan intensitas emisi tahun 2022 sebesar 1.920,8 tCO₂eq per juta USD per juta USD pendapatan, keberhasilan target dekarbonisasi dan komitmen netral karbon TBS2030 akan sangat ditentukan oleh efektivitas rencana pelepasan aset PLTU pada tahun 2024 yang diproyeksikan mereduksi emisi hingga 85%, integrasi strategi ekspansi energi bersih, serta konsistensi dukungan regulasi pemerintah.

REFERENSI

- Abeydeera, L. H. U. W., Mesthrige, J. W., & Samarasinghalage, T. I. (2019). Global research on carbon emissions: A scientometric review. In *Sustainability (Switzerland)*, 11(14), 1-24. <https://doi.org/10.3390/su11143972>
- Acquaye, A., Feng, K., Oppon, E., Salhi, S., Ibn-Mohammed, T., Genovese, A., & Hubacek, K. (2017). Measuring the environmental sustainability performance of global supply chains: A multi-regional input-output analysis for carbon, sulphur oxide and water footprints. *Journal of Environmental Management*, 187, 371-385. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.059>
- Acquaye, A., Ibn-Mohammed, T., Genovese, A., Afrifa, G. A., Yamoah, F. A., & Oppon, E. (2018). A quantitative model for environmentally sustainable supply chain performance measurement. *European Journal of Operational Research*, 269(1), 188-205. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.10.057>
- Bosi, M. K., Lajuni, N., Wellfren, A. C., & Lim, T. S. (2022). Sustainability reporting through environmental, social, and governance: A bibliometric review. *Sustainability*, 14(19), 1–22. <https://doi.org/10.3390/su141912071>
- Burns, W. (2017). The case for case studies in confronting environmental issues. *Case Studies in the Environment*, 1(1), 1–9. <https://doi.org/10.1525/cse.2017.sc.burns01>

- Crowe, S., Cresswell, K., Robertson, A., Huby, G., Avery, A., & Sheikh, A. (2011). The case study approach. *BMC Medical Research Methodology*, 11(1), 1-9. <https://doi.org/10.1186/1471-2288-11-100>
- Fitriana, I., Hadiyanto, Warsito, B., Hilmawan, E., & Santosa, J. (2024). The optimization of power generation mix to achieve net zero emission pathway in Indonesia without specific time target. *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, 41, 5–19. <https://doi.org/10.54337/ijsepm.8263>
- Hasan, J., Thomas, A., & Tomos, O. (2024). Sustainable supply chain practices in the oil and gas industry: A case study. *Sustainability*, 16(5), 1–21. <https://doi.org/10.3390/su16051720>
- Hazaea, S. A., Zhu, J., Khatib, S. F. A., Bazhair, A. H., & Elamer, A. A. (2022). Sustainability assurance practices: A systematic review and future research agenda. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(4), 4843–4864. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17359-9>
- Hsieh, H. F., & Shannon, S. E. (2005). Three approaches to qualitative content analysis. *Qualitative Health Research*, 15(9), 1277–1288. <https://doi.org/10.1177/1049732305276687>
- Isharyadi, F., & Kristiningrum, E. (2021). Profile of system and product certification as quality infrastructure in Indonesia. *Open Engineering*, 11(1), 556–569. <https://doi.org/10.1515/eng-2021-0054>
- Klaaßen, L., & Stoll, C. (2021). Harmonizing corporate carbon footprints. *Nature Communications*, 12(1), 6149. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26349-x>
- Kleinheksel, A. J., Rockich-Winston, N., Tawfik, H., & Wyatt, T. R. (2020). Demystifying content analysis. *American Journal of Pharmaceutical Education*, 84(1), 127–137. <https://doi.org/10.5688/ajpe7113>
- Liberati, A., Altman, D. G., Tetzlaff, J., Mulrow, C., Gøtzsche, P. C., Ioannidis, J. P. A., Clarke, M., Devereaux, P. J., Kleijnen, J., & Moher, D. (2009). The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: explanation and elaboration. *Journal of Clinical Epidemiology*, 62(10), 1-34. <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2009.06.006>
- Maharani, D. (2024). Carbon Emission Disclosure: A Study Of Manufacturing Companies In Indonesia 2018 – 2022. *Jurnal Ilmu Manajemen*, 21(2), 101–116. <https://doi.org/10.21831/jim.v21i2.78669>
- Matthews, H. S., Hendrickson, C. T., & Weber, C. L. (2008). The importance of carbon footprint estimation boundaries. *Environmental Science and Technology*, 42(16), 5839–5842. <https://doi.org/10.1021/es703112w>
- Olmos-Vega, F. M., Stalmeijer, R. E., Varpio, L., & Kahlke, R. (2023). A practical guide to reflexivity in qualitative research: AMEE Guide No. 149. *Medical Teacher*, 45(3), 241–251. <https://doi.org/10.1080/0142159X.2022.2057287>
- 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. In *BMJ*. 372. BMJ Publishing Group. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>

- PT TBS Energi Utama Tbk. (2022). *Laporan Keberlanjutan 2022: Towards a Better Society*. PT TBS Energi Utama Tbk.
- Putri, N. A., Pamungkas, N., & Suryaningsum, S. (2022). Pengaruh Kepemilikan Institusional, Kinerja Lingkungan, Profitabilitas, dan Pertumbuhan Terhadap carbon emission disclosure. *Jurnal Akuntansi Bisnis*, 20(2). <https://doi.org/10.24167/jab.v20i2.4826>
- Rahmanita, S. (2020). Pengaruh Carbon Emission Disclosure Terhadap Nilai Perusahaan Dengan Kinerja Lingkungan Sebagai Variabel Pemoderasi. *Akuntansi: Jurnal Akuntansi Integratif*, 6(1), 54-71. <https://doi.org/10.29080/jai.v6i01.273>
- Rajamani, L. (2016). Ambition and differentiation in the 2015 paris agreement: interpretative possibilities and underlying politics. *International and Comparative Law Quarterly*, 65(2), 493–514. <https://doi.org/10.1017/S0020589316000130>
- Sadai, S., Spector, R. A., DeConto, R., & Gomez, N. (2022). The Paris Agreement and Climate Justice: Inequitable Impacts of Sea Level Rise Associated with Temperature Targets. In *Earth's Future*, 10(12), 1-29. <https://doi.org/10.1029/2022EF002940>
- Siagian, A. W., Daffa Alghazali, M. S., & Alify, R. F. (2023). Menuju transisi energi 2050: Quo vadis energi baru dan terbarukan. *Jurnal Hukum Lingkungan Indonesia*, 9(1), 187–202. <https://doi.org/10.38011/jhli.v9i1.471>
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333–339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- Zhao, Z., Liu, C., Xie, H., Li, Y., Zhu, C., & Liu, M. (2023). Carbon accounting and carbon emission reduction potential analysis of sponge cities based on life cycle assessment. *Water*, 15(20), 1-15. <https://doi.org/10.3390/w15203565>