Indo Green Journal
https://idngreen.com/index.php/green

e-ISSN: 3025 – 4574, p-ISSN: 3025 – 2679
Volume 4 Nomor 2 Tahun 2026
Halaman: 1806 – 1815

RESEARCH ARTICLE

Tinjauan Bibliografi: Analisis Komparatif Peran Radiative Forcing CO_2 dan Aktivitas Matahari dalam Dinamika Perubahan Iklim Global

Rustam BR[1], Zulkarnain[2]
Manajemen Hutan, Ilmu Pertanian, Indonesia[1]
Universitas Haluoleo, Indonesia[2]

rustamburaerah@gmail.com[1]

Kata Kunci:
Karbon Dioksida, Aktivitas Matahari, Perubahan Iklim, Bibliographic Review, Pemanasan Global

Abstrak

Perubahan iklim global merupakan isu lingkungan yang dipengaruhi oleh interaksi antara faktor antropogenik dan faktor alami, khususnya karbon dioksida dan aktivitas Matahari. Namun, masih terdapat perbedaan pandangan dalam literatur ilmiah mengenai besarnya kontribusi masing-masing faktor terhadap pemanasan global. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kontribusi relatif karbon dioksida dan aktivitas Matahari terhadap perubahan iklim global melalui pendekatan tinjauan bibliografi. Metode yang digunakan adalah bibliographic review terhadap berbagai studi ilmiah, termasuk hasil observasi, model iklim global, dan rekonstruksi paleoklimat yang relevan. Hasil kajian menunjukkan bahwa karbon dioksida memiliki kontribusi dominan terhadap peningkatan suhu global dibandingkan aktivitas Matahari. Sebagian besar literatur menyimpulkan bahwa tren pemanasan global modern lebih banyak dijelaskan oleh peningkatan konsentrasi karbon dioksida, sedangkan aktivitas Matahari hanya memberikan kontribusi kecil yang bersifat variatif jangka pendek. Perbedaan respons iklim ini dipengaruhi oleh mekanisme umpan balik atmosfer seperti uap air, awan, dan lapse rate yang memperkuat efek karbon dioksida. Selain itu, dalam skala jangka panjang, karbon dioksida berperan penting dalam menjaga keseimbangan energi sistem iklim bumi. Kesimpulannya, karbon dioksida merupakan faktor utama pengendali perubahan iklim modern, sedangkan aktivitas Matahari berperan sebagai faktor pendukung dengan kontribusi yang lebih kecil. Temuan ini menegaskan pentingnya pengendalian emisi karbon dalam strategi mitigasi perubahan iklim global.

Key Word:
Carbon Dioxide, Solar Activity, Climate Change, Bibliographic Review, Global Warming

Abstract

Global climate change is driven by the interaction between anthropogenic and natural factors, particularly carbon dioxide and solar activity. However, scientific literature still presents differing views regarding the magnitude of their respective contributions to global warming. This study aims to analyze the relative contributions of carbon dioxide and solar activity to global climate change using a bibliographic review approach. The method involves a comprehensive review of relevant scientific studies, including observational datasets, global climate model outputs, and paleoclimate reconstructions. The results indicate that carbon dioxide plays a dominant role in driving global temperature increases compared to solar activity. Most literature agrees that modern warming trends are primarily explained by rising atmospheric carbon dioxide concentrations, while solar activity contributes only marginal and short-term variability. These differences are influenced by atmospheric feedback mechanisms such as water vapor, clouds, and lapse rate feedback, which amplify the effect of carbon dioxide. Furthermore, on longer time scales, carbon dioxide plays a crucial role in regulating Earth's climate energy balance. In conclusion, carbon dioxide is identified as the primary driver of modern climate change, whereas solar activity acts as a secondary and less significant factor. These findings highlight the importance of carbon emission reduction in global climate change mitigation strategies

Information Production:
© 2026 *by the authors of this article. This work is licensed under an Attribution-ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA*

PENDAHULUAN

Perubahan iklim global merupakan salah satu tantangan lingkungan terbesar yang dihadapi umat manusia pada abad ke-21. Peningkatan suhu rata-rata permukaan bumi yang teramati sejak Revolusi Industri telah memicu berbagai dampak lingkungan, sosial, dan ekonomi, mulai dari peningkatan frekuensi cuaca ekstrem, perubahan pola curah hujan, kenaikan muka air laut, hingga gangguan terhadap ketahanan pangan dan keanekaragaman hayati.

Dalam konteks ilmiah, salah satu perdebatan paling penting adalah mengenai atribusi penyebab pemanasan global modern. Perdebatan tersebut berfokus pada sejauh mana perubahan suhu global dipengaruhi oleh peningkatan konsentrasi gas rumah kaca antropogenik, khususnya karbon dioksida (CO_2),

e-ISSN: 3025 – 4574
p-ISSN: 3025 – 2679

dibandingkan dengan variabilitas alami sistem iklim yang berasal dari aktivitas Matahari.

Pemisahan kontribusi kedua faktor tersebut memiliki implikasi strategis yang sangat besar. Kesalahan dalam mengestimasi kontribusi relatif masing-masing agen forcing dapat menyebabkan bias dalam perhitungan sensitivitas iklim, menurunkan akurasi proyeksi perubahan iklim, serta menghasilkan kebijakan mitigasi dan adaptasi yang kurang efektif.

Meskipun laporan-laporan IPCC secara konsisten menyimpulkan bahwa peningkatan konsentrasi gas rumah kaca merupakan penyebab utama pemanasan global sejak pertengahan abad ke-20, sejumlah penelitian masih menunjukkan bahwa pengaruh aktivitas Matahari mungkin lebih besar daripada yang diasumsikan dalam model iklim konvensional. Ketidakpastian ini terutama berkaitan dengan mekanisme solar forcing non-Total Solar Irradiance (TSI), seperti aktivitas magnetik Matahari, sinar kosmik, dan interaksinya dengan sistem awan.

Berbagai studi, mulai dari analisis statistik klasik oleh Thomson (1997) hingga simulasi terbaru berbasis CMIP6 oleh Mokhov dan Smirnov (2024), menunjukkan bahwa tren pemanasan global saat ini jauh melampaui variabilitas alami yang dapat dijelaskan oleh perubahan irradiansi Matahari semata. Namun demikian, masih terdapat sejumlah pertanyaan mendasar mengenai bagaimana fluktuasi energi Matahari yang relatif kecil dapat memicu respons iklim yang kompleks melalui berbagai mekanisme umpan balik atmosfer.

Oleh karena itu, artikel ini bertujuan untuk melakukan sintesis terhadap dua puluh penelitian utama yang membahas hubungan antara radiative forcing CO_2 dan aktivitas Matahari dalam perubahan iklim global. Fokus utama kajian ini adalah mengevaluasi kontribusi relatif kedua faktor tersebut, mengidentifikasi mekanisme fisik yang mendasarinya, serta merumuskan research gap yang penting bagi pengembangan model iklim generasi mendatang.

METODE PENELITIAN

Kajian ini menggunakan pendekatan bibliographic review yang mengintegrasikan berbagai hasil penelitian empiris, simulasi model iklim, studi atribusi, dan rekonstruksi paleoklimatologi. Literatur yang dianalisis mencakup penelitian yang dipublikasikan antara tahun 1997 hingga 2024 dan berasal dari berbagai jurnal internasional bereputasi di bidang klimatologi, geofisika, ilmu atmosfer, dan ilmu kebumian.

Untuk mempermudah sintesis dan interpretasi hasil, artikel-artikel yang direview dikelompokkan ke dalam empat klaster penelitian utama:

Tabel 1. Artikel yang direview

No.	Tema Penelitian	Fokus Utama	Daftar Penulis / Artikel
1	Kuantifikasi kontribusi CO_2 vs solar terhadap pemanasan modern	Menentukan seberapa besar masing-masing faktor menjelaskan tren suhu dari abad ke-19 hingga ke-21.	Thomson (1997); Seip & Grøn (2017); Mokhov & Smirnov (2023, 2024); Bhargawa & Singh (2019); Scafetta (2023); Beer et al. (2000); Adhikari et al. (2023); Booth (2018); Drótos et al. (2024); Lightfoot & Ratzer (2022).
2	Perbedaan mekanisme fisik & sensitivitas iklim (efikasi CO_2 vs solar)	Menjelaskan alasan mengapa efek CO_2 berbeda dengan efek Matahari meskipun memiliki satuan *forcing* yang sama.	Modak et al. (2016); Kaur et al. (2023); Cao et al. (2012); Shine et al. (2022).
3	Respons awan, hidrologi, dan geoengineering / transisi iklim ekstrem	Menganalisis bagaimana awan, presipitasi, dan sistem iklim merespons *forcing* CO_2 vs solar, termasuk skenario *geoengineering* dan *moist greenhouse*.	Popp et al. (2016); Russotto & Ackerman (2018); Aerenson & Marchand (2024).
4	Perspektif geologis jangka panjang (Skala 250–420 juta tahun)	Mempelajari peran jangka sangat panjang antara CO_2 dibandingkan dengan peningkatan luminositas Matahari secara bertahap.	Foster et al. (2017); Li et al. (2023).

Pendekatan pengelompokan ini memungkinkan identifikasi pola konsisten, perbedaan temuan, serta area ketidakpastian ilmiah yang masih memerlukan penelitian lebih lanjut.

Tabel 2. Ringkasan Metodologi Penelitian yang Direview

No.	Penulis (Tahun)	Tujuan Penelitian	Data/Objek Penelitian	Metode dan Teknik Analisis
1	Thomson (1997)	Mengukur kontribusi CO_2 dan irradiansi Matahari terhadap suhu global	Deret waktu CO_2, Total Solar Irradiance (TSI), dan suhu hemisfer	Analisis deret waktu menggunakan transfer function untuk mengestimasi respons suhu terhadap CO_2 dan TSI
2	Beer et al. (2000)	Menilai peran Matahari dalam perubahan iklim historis	Rekonstruksi irradiansi surya, proxy kosmogenik, dan data iklim	Kajian proses iklim dan regresi nonlinier untuk memisahkan forcing alami dan antropogenik

e-ISSN: 3025 – 4574
p-ISSN: 3025 – 2679

3	Seip dan Grøn (2017)	Mengidentifikasi hubungan kausal antara CO_2, TSI, dan suhu global	Data CO_2, TSI, dan Global Temperature Anomaly (1880–2010)	Metode before–after (lead–lag analysis) pada komponen tren dan siklus
4	Foster et al. (2017)	Menganalisis forcing iklim selama 420 juta tahun	1.241 estimasi CO_2 berbasis lima proxy dan rekonstruksi TSI	Standardisasi proxy dan analisis evolusi forcing radiasi jangka panjang
5	Popp et al. (2016)	Menguji transisi menuju kondisi *moist greenhouse* akibat CO_2 dan forcing surya	Model iklim tiga dimensi (aqua-planet)	Simulasi numerik berbagai skenario CO_2 dan solar forcing
6	Cao et al. (2012)	Mengkaji respons iklim jangka pendek terhadap perubahan CO_2 dan solar forcing	Model HadCM3L dengan 180 simulasi bulanan	Large ensemble experiment dan analisis respons suhu, uap air, serta neraca hidrologi
7	Modak et al. (2016)	Menjelaskan perbedaan efikasi forcing surya dan CO_2	Simulasi NCAR CAM5 dan Hadley Centre	Eksperimen 2×CO_2 dan +2,25% solar forcing menggunakan Gregory Method dan analisis feedback
8	Li et al. (2023)	Mengukur kontribusi CO_2, solar forcing, awan, dan albedo selama 250 juta tahun	26 simulasi CESM1.2.2 setiap interval 10 juta tahun	Analisis sensitivitas dan energy balance analysis
9	Russotto dan Ackerman (2018)	Menentukan besarnya reduksi solar forcing untuk mengimbangi 4×CO_2	Output 11 General Circulation Models (GeoMIP G1)	Analisis multi-model terhadap suhu, kelembapan, awan, dan *radiative adjustment*
10	Aerenson dan Marchand (2024)	Menganalisis feedback awan akibat forcing surya dan CO_2	Simulasi abrupt solar forcing dan perubahan CO_2	Dekomposisi feedback awan menjadi komponen termal dan non-termal
11	Shine et al. (2022)	Memisahkan komponen shortwave dan longwave radiative forcing gas rumah kaca	Simulasi radiatif CO_2, CH_4, dan O_3	Perhitungan forcing radiasi shortwave dan longwave
12	Kaur et al. (2023)	Menjelaskan mengapa sensitivitas iklim terhadap forcing surya lebih kecil daripada CO_2	Simulasi NCAR CAM4	Analisis feedback menggunakan Radiative Kernel Method
13	Bhargawa dan Singh (2019)	Mengkaji hubungan TSI, indikator iklim, dan CO_2	Data TSI, suhu global, muka laut, es laut, presipitasi, dan CO_2 (1978–2017)	Vector Autoregression (VAR), impulse response, dan variance decomposition
14	Booth (2018)	Mengestimasi kontribusi solar cycle dan CO_2 terhadap suhu global	Data panjang siklus Matahari, CO_2, dan GAST	Model regresi statistik dan estimasi sensitivitas iklim
15	Adhikari et al. (2023)	Menilai hubungan aktivitas Matahari dengan indikator perubahan iklim	Data sunspot, indeks geomagnetik, CO_2, CH_4, TSI, dan suhu	Korelasi, cross-correlation, dan Continuous Wavelet Transform
16	Scafetta (2023)	Menilai kontribusi Matahari menggunakan multi-proxy solar activity	Data suhu global, proxy aktivitas surya, forcing antropogenik dan vulkanik	Energy Balance Model dan Multilinear Regression Analysis
17	Mokhov dan Smirnov (2023)	Mengestimasi kontribusi insolasi terhadap tren suhu lintang berbeda	Data iklim historis, insolasi, GHG, ENSO, AMO	Model autoregresif multifaktor
18	Mokhov dan Smirnov (2024)	Mengukur kontribusi gas rumah kaca dan aktivitas Matahari terhadap suhu global	Output CMIP6 dan HadCRUT5	Model autoregresif multivariat dan analisis skenario kontrafaktual
19	Drótos et al. (2024)	Menguji apakah variasi TSI dapat menjelaskan pemanasan global modern	Model PlaSim dan ensemble simulasi besar	Converged Ensemble Simulation dan analisis distribusi tren GMST
20	Lightfoot dan Ratzer (2022)	Membandingkan peran Matahari dan CO_2 dalam proyeksi suhu hingga 2050	Data suhu satelit, CO_2, dan indikator aktivitas surya	Analisis tren historis dan proyeksi komparatif

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dominasi CO_2 dalam Pemanasan Global Modern

Hasil sintesis terhadap berbagai penelitian yang direview menunjukkan adanya konsensus yang relatif kuat bahwa peningkatan konsentrasi gas rumah kaca, khususnya karbon dioksida (CO_2), merupakan faktor dominan yang menjelaskan tren pemanasan global sejak akhir abad ke-19. Meskipun aktivitas Matahari tetap memberikan kontribusi terhadap variabilitas iklim bumi, sebagian besar studi menyimpulkan bahwa pengaruhnya relatif lebih kecil dibandingkan forcing antropogenik yang berasal dari peningkatan konsentrasi CO_2 di atmosfer.

e-ISSN: 3025 – 4574
p-ISSN: 3025 – 2679

Salah satu penelitian awal yang mendukung temuan tersebut dilakukan oleh Thomson (1997), yang menunjukkan bahwa pengaruh CO_2 terhadap perubahan suhu global selama abad ke-20 sekitar tiga kali lebih besar dibandingkan pengaruh perubahan irradiansi Matahari. Hasil ini mengindikasikan bahwa peningkatan konsentrasi CO_2 memiliki kemampuan yang jauh lebih kuat dalam memengaruhi keseimbangan energi sistem iklim dibandingkan variasi energi yang berasal dari aktivitas Matahari.

Temuan tersebut diperkuat oleh penelitian Seip dan Grøn (2017) yang menggunakan pendekatan hubungan kausal (*lead-lag analysis*) antara konsentrasi CO_2, Total Solar Irradiance (TSI), dan Global Temperature Anomaly (GTA). Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa sekitar 90% tren pemanasan global selama periode 1880–2010 dapat dijelaskan oleh peningkatan konsentrasi CO_2, sedangkan kontribusi aktivitas Matahari diperkirakan hanya sekitar 10%. Temuan ini semakin memperkuat argumen bahwa perubahan iklim modern lebih banyak dipengaruhi oleh faktor antropogenik dibandingkan faktor alami.



Gambar 1. Atribusi Pemanasan Modern (1880 – 2010)

Tabel 3. Estimasi Kontribusi Relatif CO_2 dan Aktivitas Matahari

Studi	Kontribusi CO_2	Kontribusi Matahari
Thomson (1997)	±75%	±25%
Seip & Grøn (2017)	±90%	±10%
Mokhov & Smirnov (2024)	Dominan	Minor
Drótos et al. (2024)	Dominan	Tidak cukup menjelaskan tren

Secara keseluruhan, bukti empiris dan simulasi model menunjukkan bahwa peningkatan CO_2 merupakan faktor utama yang menjelaskan pemanasan global modern.

Mengapa Forcing Matahari Kurang Efektif dibandingkan CO_2?

Salah satu temuan penting yang muncul dari berbagai penelitian adalah bahwa forcing surya dan forcing CO_2 tidak menghasilkan respons iklim yang identik, meskipun keduanya dapat memberikan besaran forcing radiatif yang setara. Dengan kata lain, tambahan energi yang masuk ke sistem iklim melalui peningkatan irradiansi Matahari tidak selalu menghasilkan tingkat pemanasan yang sama dengan tambahan energi yang berasal dari peningkatan konsentrasi CO_2 di atmosfer.

Modak et al. (2016) menunjukkan bahwa untuk menghasilkan kenaikan suhu global yang setara dengan pemanasan akibat pelipatan konsentrasi CO_2, diperlukan peningkatan Total Solar Irradiance (TSI) sekitar 2,25%. Hasil ini mengindikasikan bahwa efikasi forcing surya lebih rendah dibandingkan forcing CO_2, dengan nilai sekitar 80% dari efektivitas forcing gas rumah kaca. Temuan tersebut menunjukkan bahwa sistem iklim memiliki sensitivitas yang berbeda terhadap sumber forcing yang berbeda, meskipun besarnya forcing radiatif secara teoritis setara.



Gambar 2. Paradoks Efikasi Forcing

Penjelasan lebih rinci diberikan oleh Kaur et al. (2023), yang menemukan bahwa perbedaan sensitivitas tersebut terutama disebabkan oleh variasi pola distribusi energi dan mekanisme umpan balik (*climate feedbacks*) yang dihasilkan oleh masing-masing forcing. Forcing surya meningkatkan energi yang

e-ISSN: 3025 – 4574
p-ISSN: 3025 – 2679

diterima bumi secara relatif merata pada lapisan atas atmosfer, sedangkan forcing CO_2 bekerja dengan mengubah keseimbangan radiasi gelombang panjang melalui peningkatan penyerapan dan pemancaran kembali radiasi inframerah di atmosfer. Perbedaan mekanisme ini menghasilkan respons yang berbeda pada komponen-komponen sistem iklim.

Lebih lanjut, peningkatan konsentrasi CO_2 memicu umpan balik positif yang lebih kuat melalui peningkatan kandungan uap air atmosfer, perubahan *lapse rate*, serta respons awan yang cenderung memperkuat pemanasan. Sebaliknya, forcing surya menghasilkan pola umpan balik yang relatif lebih lemah sehingga menghasilkan sensitivitas iklim yang lebih rendah dibandingkan forcing CO_2 dengan besaran radiatif yang sama.

Selain mekanisme atmosferik, CO_2 juga memiliki pengaruh tambahan melalui proses fisiologis vegetasi yang tidak dimiliki oleh forcing surya. Peningkatan konsentrasi CO_2 dapat mengurangi bukaan stomata pada daun, menurunkan laju transpirasi, mengubah keseimbangan energi permukaan, serta memengaruhi pertukaran air dan panas antara vegetasi dan atmosfer. Efek fisiologis ini berkontribusi terhadap perubahan suhu permukaan dan siklus hidrologi, sehingga memperkuat dampak iklim yang ditimbulkan oleh peningkatan CO_2.

Tabel 4. Jejak Iklim: Perbandingan Mekanisme Fisik

	Jejak Matahari (TSI)	Jejak CO_2
Jenis Radiasi	Gelombang Pendek (Shortwave)	Gelombang Panjang (Longwave)
Distribusi Energi	Merata di atmosfer atas (Top-down)	Diserap dan dipancarkan dari bawah (Bottom-up)
Kekuatan Umpan Balik (Feedback)	Relatif Lemah	Sangat Kuat (Lapse rate & Uap air)
Dampak Fisiologis Biosfer	Tidak ada dampak langsung	Memicu penutupan stomata daun & menekan transpirasi (Kaur et al., 2023)

Secara keseluruhan, hasil-hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa respons sistem iklim tidak hanya ditentukan oleh besarnya forcing radiatif, tetapi juga oleh mekanisme fisik yang mengatur distribusi energi dan interaksi berbagai komponen sistem bumi. Oleh karena itu, satuan energi tambahan yang berasal dari peningkatan konsentrasi CO_2 cenderung menghasilkan perubahan iklim yang lebih besar dibandingkan satuan energi tambahan yang berasal dari peningkatan aktivitas Matahari.

Respons Awan, Hidrologi, dan Geoengineering

Hasil kajian literatur menunjukkan bahwa perbedaan sumber forcing tidak hanya memengaruhi besarnya pemanasan global, tetapi juga menentukan bagaimana sistem iklim merespons perubahan tersebut. Respons atmosfer, awan, dan siklus hidrologi terhadap forcing surya dan forcing CO_2 terbukti tidak identik, meskipun keduanya dapat menghasilkan perubahan suhu global yang relatif serupa. Temuan ini menjadi penting karena menunjukkan bahwa perubahan iklim tidak dapat dijelaskan hanya berdasarkan besarnya forcing radiatif, tetapi juga harus mempertimbangkan mekanisme fisik yang mendasari respons sistem bumi.

Salah satu pendekatan yang banyak digunakan untuk memahami perbedaan tersebut adalah melalui simulasi geoengineering berbasis pengurangan irradiansi Matahari (*solar radiation management*). Russotto dan Ackerman (2018) menemukan bahwa untuk menyeimbangkan pemanasan yang dihasilkan oleh peningkatan konsentrasi CO_2 hingga empat kali lipat, diperlukan pengurangan irradiansi Matahari sebesar sekitar 3,2–5%. Hasil ini menunjukkan bahwa secara global penurunan forcing surya memang dapat mengurangi kenaikan suhu rata-rata permukaan bumi.

Namun demikian, penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa pengurangan forcing surya tidak mampu sepenuhnya mengembalikan kondisi atmosfer ke keadaan sebelum peningkatan konsentrasi CO_2. Meskipun suhu global dapat didekatkan kembali ke kondisi awal, sejumlah variabel iklim lain, seperti distribusi kelembapan atmosfer, pola sirkulasi udara, dan karakteristik awan, tetap menunjukkan perbedaan yang signifikan. Temuan ini mengindikasikan bahwa forcing surya dan forcing CO_2 menghasilkan jejak respons (*climate fingerprints*) yang berbeda dalam sistem iklim.

Hasil yang sejalan dilaporkan oleh Aerenson dan Marchand (2024), yang menunjukkan bahwa respons awan terhadap pendinginan akibat pengurangan forcing surya tidak sepenuhnya simetris dengan respons awan terhadap pemanasan akibat peningkatan CO_2. Analisis mereka menunjukkan bahwa komponen umpan balik awan yang dimediasi oleh perubahan suhu (*temperature-mediated cloud feedbacks*) dapat berbeda antara kondisi pemanasan dan pendinginan. Dengan demikian, mengurangi irradiansi Matahari tidak secara otomatis membalikkan seluruh perubahan yang telah dipicu oleh peningkatan gas rumah kaca.

e-ISSN: 3025 – 4574
p-ISSN: 3025 – 2679

Selain memengaruhi awan, perbedaan forcing juga berimplikasi pada siklus hidrologi global. Berbagai studi menunjukkan bahwa peningkatan CO_2 cenderung memperkuat kandungan uap air atmosfer dan mengubah distribusi presipitasi secara lebih signifikan dibandingkan forcing surya yang ekuivalen. Perubahan tersebut dapat memengaruhi pola curah hujan regional, intensitas kejadian ekstrem, serta ketersediaan sumber daya air pada berbagai wilayah dunia.

Implikasi yang lebih luas terhadap stabilitas sistem bumi ditunjukkan oleh penelitian Popp et al. (2016). Melalui simulasi iklim tiga dimensi, penelitian tersebut menemukan bahwa peningkatan forcing yang sangat besar, baik yang berasal dari peningkatan konsentrasi CO_2 maupun peningkatan irradiansi Matahari, berpotensi mendorong sistem iklim menuju kondisi *Moist Greenhouse*. Kondisi ini ditandai oleh peningkatan drastis kandungan uap air di atmosfer bagian atas yang dapat memperkuat efek rumah kaca secara signifikan dan mengarah pada perubahan iklim yang sulit atau bahkan tidak dapat dipulihkan.



Gambar 3. Ancaman Kondisi Moist Greenhouse

Secara keseluruhan, hasil-hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa forcing surya dan forcing CO_2 tidak hanya berbeda dalam efikasi pemanasannya, tetapi juga menghasilkan respons yang berbeda pada awan, kelembapan atmosfer, dan siklus hidrologi. Temuan ini menegaskan bahwa upaya mitigasi perubahan iklim melalui manipulasi forcing surya tidak dapat sepenuhnya menggantikan pengurangan emisi gas rumah kaca, karena kedua jenis forcing menghasilkan konsekuensi fisik yang berbeda terhadap sistem iklim bumi.

Perspektif Geologis Jangka Panjang

Berbeda dengan kajian perubahan iklim modern yang umumnya berfokus pada rentang waktu beberapa dekade hingga abad, penelitian paleoklimatologi memberikan perspektif yang lebih luas mengenai peran relatif CO_2 dan aktivitas Matahari dalam mengendalikan iklim bumi selama jutaan tahun. Hasil-hasil penelitian dalam skala geologis menunjukkan bahwa kedua faktor tersebut berinteraksi secara kompleks dan membentuk keseimbangan jangka panjang yang memungkinkan bumi tetap berada dalam kondisi layak huni.

Li et al. (2023) menunjukkan bahwa selama sekitar 250 juta tahun terakhir, variasi konsentrasi gas rumah kaca merupakan faktor yang paling dominan dalam menjelaskan perubahan suhu global. Berdasarkan simulasi iklim paleogeografis, penelitian tersebut memperkirakan bahwa perubahan konsentrasi gas rumah kaca berkontribusi sekitar 12,2°C terhadap variasi suhu rata-rata global, sedangkan perubahan aktivitas Matahari hanya berkontribusi sekitar 1,5°C. Temuan ini menunjukkan bahwa meskipun energi Matahari merupakan sumber energi utama sistem iklim bumi, perubahan konsentrasi CO_2 memiliki pengaruh yang jauh lebih besar dalam mengendalikan fluktuasi suhu pada skala waktu geologis.

Temuan tersebut diperkuat oleh penelitian Foster et al. (2017) yang menganalisis evolusi forcing iklim selama 420 juta tahun terakhir. Hasil penelitian menunjukkan bahwa luminositas Matahari secara bertahap meningkat seiring evolusi bintang induk bumi. Secara teoritis, peningkatan energi Matahari tersebut seharusnya menyebabkan kenaikan suhu global yang signifikan. Namun, kenyataannya bumi tetap mempertahankan kondisi iklim yang relatif stabil dan mendukung kehidupan selama ratusan juta tahun. Stabilitas tersebut terjadi karena peningkatan luminositas Matahari diimbangi oleh penurunan konsentrasi CO_2 atmosfer melalui berbagai proses geologis jangka panjang, seperti pelapukan batuan silikat, sedimentasi karbonat, dan siklus karbon global.

e-ISSN: 3025 – 4574
p-ISSN: 3025 – 2679



Bumi bertahan dari peningkatan radiasi Matahari karena secara geologis membuang CO_2 (pelapukan batuan). Saat ini, manusia membalikkan keseimbangan geologis tersebut dalam hitungan dekade (Foster et al., 2017).

Gambar 4. Paradoks 420 juta tahun (skala geologis)

Kedua penelitian tersebut menunjukkan bahwa dalam skala waktu geologis, sistem iklim bumi dikendalikan oleh mekanisme umpan balik jangka panjang yang menjaga keseimbangan antara energi yang diterima dari Matahari dan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer. Dengan kata lain, aktivitas Matahari dan CO_2 tidak bekerja secara independen, melainkan saling berinteraksi melalui berbagai proses geologi dan biogeokimia yang mengatur keseimbangan energi bumi.

Perspektif paleoklimatologi ini memberikan pemahaman penting bahwa perubahan iklim modern tidak dapat dipisahkan dari konteks evolusi sistem bumi secara keseluruhan. Meskipun variasi aktivitas Matahari berkontribusi terhadap dinamika iklim, bukti geologis menunjukkan bahwa perubahan konsentrasi CO_2 merupakan faktor yang lebih menentukan dalam mengontrol suhu global pada skala waktu yang sangat panjang. Oleh karena itu, keseimbangan antara forcing surya dan forcing gas rumah kaca dapat dipandang sebagai salah satu mekanisme fundamental yang menjaga stabilitas iklim bumi sepanjang sejarah geologinya.

Secara keseluruhan, hasil-hasil penelitian paleoklimatologi mengindikasikan bahwa kestabilan iklim bumi dalam jangka panjang sangat bergantung pada keseimbangan dinamis antara peningkatan energi Matahari dan regulasi konsentrasi gas rumah kaca. Ketika keseimbangan tersebut terganggu, baik oleh perubahan alami maupun aktivitas manusia, sistem iklim berpotensi mengalami perubahan yang signifikan.

Research Gap

Meskipun sebagian besar penelitian menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi CO_2 merupakan faktor dominan dalam pemanasan global modern, hasil kajian literatur mengindikasikan masih terdapat sejumlah ketidakpastian ilmiah dan kesenjangan penelitian (*research gaps*) yang perlu mendapat perhatian lebih lanjut. Kesenjangan tersebut terutama berkaitan dengan perbedaan estimasi kontribusi relatif antara forcing antropogenik dan forcing alami, mekanisme fisik yang mendasari respons sistem iklim, serta keterbatasan representasi proses-proses tertentu dalam model iklim modern.

Topik / Dimensi	Mekanisme Fisik & Feedback	Kuantifikasi Kontribusi CO_2 vs Matahari (Modern)	Skala Ekstrem / Jangka Panjang	Proses Solar Non-TSI & Variabilitas
Forcing CO_2 vs Solar (Efikasi dan Sensitivitas)	3	3	2	1
Awan, Kelembapan, dan Siklus Hidrologi	3	1	2	GAP
Geoengineering dan Moist Greenhouse	1	GAP	3	GAP
Hubungan Solar–Iklim Berbasis Empiris dan Multi-Proxy	1	3	2	2

Keterangan:

Skor	Interpretasi
3	Banyak diteliti, bukti ilmiah relatif kuat, didukung oleh berbagai metode dan model
2	Cukup banyak diteliti, tetapi masih terdapat ketidakpastian atau perbedaan hasil antar penelitian
1	Masih terbatas diteliti, jumlah studi relatif sedikit atau bukti belum konsisten
GAP	Kesenjangan penelitian yang signifikan; masih sangat sedikit kajian atau belum terwakili secara memadai dalam model dan observasi

Kontribusi Relatif CO_2 dan Aktivitas Matahari terhadap Pemanasan Global Modern

Salah satu perdebatan utama dalam literatur adalah besarnya kontribusi relatif antara forcing antropogenik dan forcing alami terhadap pemanasan global selama abad terakhir. Sebagian besar penelitian berbasis analisis statistik, model autoregresif, dan simulasi CMIP6 menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi CO_2 merupakan faktor dominan yang menjelaskan tren kenaikan suhu global, sedangkan variasi

e-ISSN: 3025 – 4574
p-ISSN: 3025 – 2679

insolasi dan Total Solar Irradiance (TSI) dinilai tidak memberikan kontribusi yang signifikan secara statistik pada skala dekadal hingga abad (Thomson, 1997; Mokhov & Smirnov, 2023; Mokhov & Smirnov, 2024).

Namun demikian, sejumlah penelitian lain memberikan interpretasi yang berbeda. Beer et al. (2000), Booth (2018), dan Scafetta (2023) menunjukkan bahwa penggunaan indikator aktivitas surya yang lebih luas, seperti *solar cycle length* (SCL) dan berbagai *multi-proxy solar records*, menghasilkan estimasi kontribusi Matahari yang lebih besar dibandingkan pendekatan yang hanya menggunakan TSI.

Research Gap: Hingga saat ini belum tersedia kerangka atribusi yang mampu mengintegrasikan secara konsisten pendekatan model iklim berbasis fisika, metode statistik, dan rekonstruksi multi-proxy aktivitas Matahari dalam satu sistem evaluasi yang terpadu.

Mekanisme Fisik: Mengapa Forcing Surya Lebih Rendah Efikasinya dibandingkan Forcing CO_2?

Berbagai penelitian pemodelan menunjukkan bahwa sensitivitas iklim terhadap forcing surya cenderung lebih rendah dibandingkan sensitivitas terhadap forcing CO_2. Perbedaan tersebut dijelaskan oleh variasi distribusi energi secara meridional, serta perbedaan respons umpan balik atmosfer yang melibatkan lapse rate, uap air, awan, dan komponen radiasi gelombang pendek maupun gelombang panjang (Cao et al., 2012; Modak et al., 2016; Shine et al., 2022; Kaur et al., 2023).

Meskipun demikian, hasil yang diperoleh masih menunjukkan variasi yang cukup besar antar model iklim. Selain itu, sebagian besar kesimpulan masih didasarkan pada simulasi numerik sehingga validasi observasional terhadap mekanisme feedback tersebut masih relatif terbatas.

Research Gap: Diperlukan generalisasi lintas model (*cross-model generalization*) dan pengujian observasional yang lebih rinci untuk menjelaskan peran feedback awan, siklus hidrologi, serta interaksi komponen shortwave–longwave dalam menentukan sensitivitas iklim terhadap forcing yang berbeda.

Proses Ekstrem: Geoengineering dan Transisi Moist Greenhouse

Penelitian mengenai geoengineering menunjukkan bahwa pengurangan irradiansi Matahari sebesar sekitar 3,2–5% diperlukan untuk mengimbangi pemanasan yang dihasilkan oleh peningkatan konsentrasi CO_2 hingga empat kali lipat pada eksperimen GeoMIP G1 (Russotto & Ackerman, 2018). Namun demikian, mekanisme penyesuaian cepat yang melibatkan awan, stratosfer, dan distribusi kelembapan atmosfer masih belum sepenuhnya dipahami (Aerenson & Marchand, 2024).

Selain itu, simulasi idealisasi berbasis *aqua-planet* menunjukkan bahwa forcing yang sangat besar, baik yang berasal dari peningkatan CO_2 maupun peningkatan irradiansi Matahari, dapat mendorong sistem iklim menuju kondisi *Moist Greenhouse* yang berpotensi tidak reversibel (Popp et al., 2016).

Research Gap: Masih diperlukan studi multi-model yang terintegrasi untuk mengidentifikasi ambang kritis (*thresholds*), mekanisme histeresis, dan relevansi hasil simulasi idealisasi terhadap sistem iklim bumi yang sebenarnya.

Skala Geologis dan Variabilitas Matahari Non-TSI

Kajian paleoklimatologi menunjukkan bahwa selama ratusan juta tahun terakhir peningkatan luminositas Matahari secara bertahap diimbangi oleh penurunan konsentrasi CO_2 sehingga kestabilan iklim bumi tetap terjaga (Foster et al., 2017; Li et al., 2023). Temuan ini menunjukkan adanya mekanisme regulasi jangka panjang antara forcing surya dan siklus karbon global.

Di sisi lain, beberapa penelitian terbaru mengindikasikan bahwa pengaruh aktivitas Matahari terhadap iklim mungkin tidak hanya berasal dari perubahan TSI. Scafetta (2023) berpendapat bahwa sebagian besar pengaruh Matahari dapat berasal dari mekanisme lain seperti aktivitas magnetik Matahari, fluks partikel bermuatan, dan interaksi sinar kosmik dengan atmosfer, yang belum direpresentasikan secara memadai dalam model iklim modern.

Research Gap: Representasi proses magnetik dan partikel Matahari dalam General Circulation Models (GCM), serta konsistensi antar-proxy paleoklimatologi, masih menjadi area penelitian yang memerlukan pengembangan lebih lanjut.

Ketidakpastian Ilmiah yang Masih Tersisa

Selain research gap yang telah diidentifikasi, beberapa ketidakpastian ilmiah masih menjadi tantangan dalam memahami hubungan antara aktivitas Matahari dan perubahan iklim global.

Pertama, ketidakpastian dalam rekonstruksi TSI dan variabilitas aktivitas Matahari masih cukup besar. Perbedaan metode rekonstruksi menghasilkan rentang estimasi tren TSI yang luas sehingga mendorong penggunaan pendekatan ensemble untuk mengevaluasi berbagai skenario aktivitas Matahari. Meskipun demikian, penelitian terbaru menunjukkan bahwa bahkan pada skenario TSI maksimum yang masih

e-ISSN: 3025 – 4574
p-ISSN: 3025 – 2679

konsisten dengan observasi, pemanasan global modern tetap tidak dapat dijelaskan tanpa memasukkan peningkatan konsentrasi CO_2 (Drótos et al., 2024).

Kedua, rekonstruksi paleo-CO_2 masih menghadapi ketidakpastian yang berasal dari perbedaan metode proxy dan rentang kesalahan pengukuran. Foster et al. (2017) menunjukkan bahwa pendekatan Monte Carlo mulai digunakan untuk menyatukan berbagai sumber ketidakpastian tersebut, namun harmonisasi antar-proxy masih menjadi tantangan yang signifikan.

Ketiga, sebagian besar studi yang mengevaluasi hubungan antara aktivitas Matahari dan iklim masih bersifat korelasional. Penelitian Adhikari et al. (2023) menunjukkan adanya hubungan antara sunspot, indeks geomagnetik, dan beberapa parameter iklim, tetapi mekanisme kausal yang mendasarinya masih memerlukan pembuktian lebih lanjut.

Keempat, beberapa penelitian menunjukkan bahwa respons sistem iklim terhadap forcing surya dan forcing CO_2 tidak selalu bersifat linear. Penyesuaian cepat (*fast adjustment*) yang melibatkan awan, stratosfer, dan siklus hidrologi dapat menghasilkan interaksi yang kompleks sehingga menyulitkan pemisahan kontribusi masing-masing forcing terhadap perubahan iklim yang diamati (Russotto & Ackerman, 2018).

Secara keseluruhan, meskipun bukti ilmiah saat ini mendukung dominasi CO_2 sebagai penggerak utama pemanasan global modern, masih terdapat ketidakpastian penting terkait variabilitas aktivitas Matahari, mekanisme feedback atmosfer, proses solar non-TSI, serta respons sistem iklim pada kondisi forcing ekstrem dan skala geologis jangka panjang.

KESIMPULAN

Berdasarkan sintesis terhadap berbagai penelitian yang direview, dapat disimpulkan bahwa peningkatan konsentrasi CO_2 merupakan faktor dominan yang menjelaskan pemanasan global modern. Aktivitas Matahari tetap berperan dalam sistem iklim bumi, namun kontribusinya relatif kecil pada skala waktu dekadal hingga abad. Secara fisik, forcing CO_2 terbukti lebih efektif dibandingkan forcing surya dalam menghasilkan perubahan suhu global karena melibatkan berbagai mekanisme umpan balik atmosfer dan biosfer. Selain itu, simulasi model iklim menunjukkan bahwa variasi irradiansi Matahari yang realistis tidak mampu menjelaskan tren pemanasan global yang diamati saat ini tanpa memasukkan peningkatan konsentrasi gas rumah kaca. Meskipun demikian, sejumlah ketidakpastian masih terdapat pada mekanisme solar non-TSI, interaksi antara aktivitas Matahari dan awan, serta efektivitas geoengineering berbasis pengurangan forcing surya. Oleh karena itu, penelitian masa depan perlu difokuskan pada integrasi observasi satelit, rekonstruksi paleoklimatologi, dan model iklim generasi baru untuk meningkatkan akurasi atribusi perubahan iklim global.

DAFTAR REFERENSI

Adhikari, S., Mishra, R., Parajuli, N., Adhikari, D., & Adhikari, B. (2023). Correlation of sunspot numbers and geomagnetic indices with various climate change parameters. *Journal of Nepal Physical Society, 9*(2). https://doi.org/10.3126/jnphyssoc.v9i2.62286

Aerenson, T., & Marchand, R. (2024). Cloud responses to abrupt solar and CO_2 forcing: 1. Temperature mediated cloud feedbacks. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 129*(1). https://doi.org/10.1029/2023JD040296

Beer, J., Mende, W., & Stellmacher, R. (2000). The role of the sun in climate forcing. *Quaternary Science Reviews, 19*(1–5), 403–415. https://doi.org/10.1016/S0277-3791(99)00072-4

Bhargawa, A., & Singh, A. K. (2019). Solar irradiance, climatic indicators and climate change: An empirical analysis. *Advances in Space Research, 64*(9), 1823–1834. https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.03.018

Booth, R. (2018). On the influence of solar cycle lengths and carbon dioxide on global temperatures. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 179*, 331–338. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.01.026

Cao, L., Bala, G., & Caldeira, K. (2012). Climate response to changes in atmospheric carbon dioxide and solar irradiance on the time scale of days to weeks. *Environmental Research Letters, 7*(3), 034015. https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/3/034015

Drótos, G., Herein, M., Haszpra, T., & Jánosi, I. M. (2024). Converged ensemble simulations of climate: Possible trends in total solar irradiance cannot explain global warming alone. *Frontiers in Earth Science, 12*. https://doi.org/10.3389/feart.2024.1240784

e-ISSN: 3025 – 4574
p-ISSN: 3025 – 2679

Foster, G. L., Royer, D. L., & Lunt, D. J. (2017). Future climate forcing potentially without precedent in the last 420 million years. *Nature Communications, 8,* Article 14845. https://doi.org/10.1038/ncomms14845

Kaur, H., Bala, G., & Seshadri, A. K. (2023). Why is climate sensitivity for solar forcing smaller than for an equivalent CO_2 forcing? *Journal of Climate, 36*(9), 2921–2940. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0980.1

Li, X., Hu, Y., Yang, J., Wei, M., Guo, J., Lan, J., Lin, Q., Yuan, S., Zhang, J., Wei, Q., Liu, Y., Nie, J., Xia, Y., & Hu, S. (2023). Climate variations in the past 250 million years and contributing factors. *Paleoceanography and Paleoclimatology, 38*(4). https://doi.org/10.1029/2022PA004503

Lightfoot, H. D., & Ratzer, G. (2022). The sun versus CO_2 as the cause of climate change projected to 2050. *Journal of Basic and Applied Sciences, 18*(1), 15–28. https://doi.org/10.29169/1927-5129.2022.18.03

Modak, A., Bala, G., Cao, L., & Caldeira, K. (2016). Why must a solar forcing be larger than a CO_2 forcing to cause the same global mean surface temperature change? *Environmental Research Letters, 11*(4), 044013. https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/4/044013

Mokhov, I. I., & Smirnov, D. A. (2023). Contribution of solar irradiance variations to surface air temperature trends at different latitudes estimated from long-term data. *Pure and Applied Geophysics, 180*(8), 3053–3070. https://doi.org/10.1007/s00024-023-03317-8

Mokhov, I. I., & Smirnov, D. A. (2024). Contributions of greenhouse gases and solar activity to global climate change from CMIP6 model simulations. *Atmospheric and Oceanic Physics*. Advance online publication.

Popp, M., Schmidt, H., & Marotzke, J. (2016). Transition to a moist greenhouse with CO_2 and solar forcing. *Nature Communications, 7,* Article 10627. https://doi.org/10.1038/ncomms10627

Russotto, R., & Ackerman, T. P. (2018). Changes in clouds and thermodynamics under solar geoengineering and implications for required solar reduction. *Atmospheric Chemistry and Physics, 18*(16), 11905–11919. https://doi.org/10.5194/acp-18-11905-2018

Scafetta, N. (2023). Empirical assessment of the role of the Sun in climate change using balanced multi-proxy solar records. *Geoscience Frontiers, 14*(5), 101650. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101650

Seip, K. L., & Grøn, Ø. (2017). A new method for identifying possible causal relationships between CO_2, total solar irradiance and global temperature change. *Theoretical and Applied Climatology, 127*(3–4), 923–938. https://doi.org/10.1007/s00704-015-1675-8

Shine, K. P., Byrom, R., & Checa-Garcia, R. (2022). Separating the shortwave and longwave components of greenhouse gas radiative forcing. *Atmospheric Science Letters, 23*(8), e1116. https://doi.org/10.1002/asl.1116

Thomson, D. J. (1997). Dependence of global temperatures on atmospheric CO_2 and solar irradiance. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 94*(16), 8370–8377. https://doi.org/10.1073/pnas.94.16.8370