



Simulasi Dampak Ledakan Supernova terhadap Planet Terdekat

Margareth Jacoba Da Gomes^{1*}, Cesilia Uli Sondang Sitanggang¹, Septi Maria Gultom¹, Howard Situmorang¹, Dewi Wulandari¹, Yuni Warty¹

¹Jurusan Fisika, Program Studi Pendidikan Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Medan, Medan, Sumatera Utara, Indonesia.

DOI: <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v6i4.1202>

Article Info:

Received : 14 September 2025
Revised : 25 September 2025
Accepted : 03 Oktober 2025
Published : 04 November 2025

Correspondence:

Margareth Jacoba Da Gomes

Phone: +6281362750175

Abstract: This study aims to analyze the comparison of kinetic energy generated by five planets in the solar system and to visually simulate the supernova explosion process as a part of exploring cosmic energy dynamics. A quantitative computational method was employed using Python programming within the Visual Studio Code environment to calculate the kinetic energy of each planet based on its mass and orbital velocity. The data were presented on a logarithmic scale graph to clearly illustrate the wide range of energy magnitudes. The simulation results show that Jupiter generates the highest energy, approximately $3,39 \times 10^{38}$ Joules, while Mercury yields the lowest, around $6,83 \times 10^{30}$ Joules. In addition to numerical analysis, this research includes a visual simulation of a supernova explosion to depict the dramatic transition of a massive star collapsing and releasing a tremendous amount of energy. The video illustrates the sequential phases of the explosion, including core collapse, shock wave formation, and the outward dispersal of stellar material represented by intense light bursts and dynamic color shifts. This visualization reinforces the understanding of the extreme energy scales involved in supernova events and their impact on the surrounding cosmic environment, including the possible formation of neutron stars or black holes. This study demonstrates how computational modeling and visual simulations can complement each other in explaining complex astrophysical phenomena and serve as an educational tool to enhance understanding of cosmic energy and stellar evolution.

Keywords: Astrophysics, Cosmic Energi, Visual Simulation, Supernova Explosion.

Citation: Gomes, M. J. D., Sitanggang, C. U. S., Gultom, S. M., Situmorang, H., Wulandari, D., & Warty, Y. (2025). Simulasi Dampak Ledakan Supernova terhadap Planet Terdekat. *Jurnal Pendidikan, Sains, Geologi, Dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*, 6(4), 1844–1851. <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v6i4.1202>

Pendahuluan

Supernova adalah ledakan bintang yang kuat dan bercahaya yang terbentuk dari bintang super raksasa yang mati. Supernova terbentuk pada tahap keempat dari kehidupan bintang, yaitu bintang yang meledak ketika bintang bermassa tinggi meledak secara kasar sebagai ledakan besar pada tahap akhir kehidupannya, setelah lapisan luarnya terlepas dan mengembang ke angkasa, dan intinya menjadi lebih padat, dan terjepit ke pusat untuk membentuk objek yang padat, lapisan luar gas dan debu menyebar ke angkasa, membentuk nebula bintang yang sering berbentuk cincin atau gelembung bercahaya. Inti sisa Supernova dapat menjadi bintang Neutron atau lubang

hitam sesuai dengan massa bintang yang meledak. Biasanya, bintang Neutron adalah bintang yang sangat terjepit yang terbentuk dari kematian bintang bermassa tinggi pada tahap kelima dari langkah kehidupan terakhir bintang masif. Sebagian besar material dalam tubuh semua burung, serangga, hewan, manusia, dan mikroba berasal dari sisa-sisa bintang supermasif setelah ledakan dahsyat (Sadiq 2024).

Gas dan material akan terlontar dengan cepat ke sisi-sisi alam semesta yang sangat jauh. Sebagian besar benda langit terbentuk dari sisa-sisa bintang bermassa tinggi setelah ledakan. Kematian bintang bermassa tinggi akan memberikan kelahiran dan evolusi baru bagi benda langit lainnya. Sebagian besar planet dan satelit

Email: margarethjacobadagomes@gmail.com

terbentuk setelah kematian supernova. Bintang bermassa rendah seperti matahari membutuhkan 5 miliar tahun lagi untuk meledak dan mendukung kehidupan dengan sedikit atom bermassa rendah, untungnya bintang bermassa tinggi terbentuk dan meledak lebih dari miliar tahun yang lalu dan mendukung makhluk untuk terbentuk dan berkembang lebih dari jutaan tahun yang lalu. Kita adalah sisa supernova ketika lapisan luarnya terlempar ke luar angkasa (Svensmark 2023).

Ledakan supernova, yaitu kematian bintang bermassa besar yang sangat dahsyat, memiliki dampak besar terhadap sistem planet di sekitarnya. Ketika supernova meledak, ia melepaskan energi yang sangat besar sekitar 10^{44} joule bersamaan dengan aliran partikel berenergi tinggi, sinar kosmik, dan unsur-unsur berat ke medium antar bintang. Jika ledakan supernova terjadi cukup dekat dengan sebuah sistem planet, gelombang kejut dan radiasi intens dapat menghancurkan atmosfer planet, memicu perubahan iklim ekstrem, dan bahkan membuat planet yang awalnya layak huni menjadi steril. Bahkan jika letak supernova lebih jauh, peningkatan fluks sinar kosmik dapat memengaruhi kimia atmosfer, menipiskan lapisan ozon, dan meningkatkan radiasi ultraviolet yang berbahaya di permukaan planet, sehingga mengancam kehidupan dan berpotensi memicu peristiwa kepunahan massal (Liu, Röpké, and Han 2023). Adapun beberapa tipe supernova, antara lain: 1. Supernova tipe Ia (SNe Ia) secara luas dianggap sebagai ledakan akibat pelarian termonuklir dalam katai putih (WD), kemungkinan besar karbon oksigen dengan massa mendekati batas Chandrasekhar. Secara historis, supernova Tipe Ia (SNe Ia) diklasifikasikan ke dalam dua kategori utama: single degenerate (SD) dan double degenerate (DD). Kedua kategori ini melibatkan sebuah katai putih yang pada akhirnya menjadi massa utama yang meledak setelah mencapai kondisi penyalaan (yakni, kerapatan dan suhu kritis). Namun, bintang yang menyumbangkan massa tambahan penting ini (disebut "donor") bisa berupa bintang biasa yang masih menjalani pembakaran nuklir di intinya atau di lapisan-lapisannya, atau bisa juga berupa bintang terdegenerasi lainnya (misalnya, katai putih kedua).

Kategorisasi ini (SD atau DD), meskipun tampak elegan dalam beberapa hal, mengabaikan mekanisme ledakan yang sebenarnya yang diyakini terutama ditentukan oleh massa katai putih yang meledak dan akibatnya, implikasi nukleosintetik dari bintang asal menjadi kabur. Klasifikasi ini juga menyisakan sedikit ruang untuk 'wilayah abu-abu' dalam hal definisi degenerasi, karena beberapa bintang donor mungkin berada dalam kategori 'semi degenerasi. Mengklasifikasikan tipe asal usul supernova

berdasarkan massa katai putih yang meledak, dibandingkan berdasarkan tipe bintang donor, memberikan pendekatan yang lebih sederhana dan lebih bermotivasi secara fisik dalam membahas asal usul SNe Ia.

Hal ini karena secara luas diyakini bahwa katai putih dengan massa Chandrasekhar meledak melalui mekanisme termonuklir yang berbeda dibandingkan dengan katai putih yang meledak jauh di bawah batas massa Chandrasekhar. Ternyata, kedua 'kategori' asal usul (SD dan DD) dapat mencakup baik supernova bermassa Chandrasekhar maupun sub-Chandrasekhar. Selain itu, supernova Tipe Ia tipe DD dapat terjadi pada hampir semua usia bintang, atau waktu tunda, mulai dari sekitar 50 juta tahun setelah pembentukan bintang. Situasi serupa juga berlaku untuk progenitor tipe SD, terutama jika mencakup donor yang menjalani pembakaran helium (Rodríguez 2022); 2. Supernova tipe II (SNe II; Minkowski 1941) adalah ledakan bintang-bintang masif dengan jumlah hidrogen yang signifikan di dalam selubung nya pada saat ledakan. Dengan demikian, klasifikasi SN sebagai Tipe II didasarkan pada keberadaan garis-garis H dalam spektrumnya. Di antara SNe II, terdapat beberapa objek yang menunjukkan garis emisi H yang sempit dalam spektrum, yang menunjukkan interaksi ejecta dengan material sirkumstelar Soker, N. (2024), 1 SNe memiliki kurva cahaya terbit panjang yang mirip dengan SN 1987A, dan beberapa SNe menunjukkan karakteristik khusus yang membuatnya unik. Sisanya mencakup sekitar 90 persen populasi SN II dalam sampel yang dibatasi volume SNe yang termasuk dalam subgrup SN IIn dan subgrup SN yang terbit lama, dan yang memiliki karakteristik khusus tidak disertakan dalam analisis saat ini.

Progenitor SNe II telah diidentifikasi secara langsung pada gambar pra-ledakan beberapa di antaranya dikonfirmasi demikian dengan menghilangnya mereka pada gambar resolusi tinggi akhir waktu. Distribusi energi spektral (SED) dan indeks warna progenitor SN II sangat cocok dengan bintang super raksasa merah (RSG) Identifikasi RSG sebagai progenitor SN II konsisten dengan hasil karya perintis yang menemukan bahwa progenitor SN II adalah bintang dengan jari-jari besar dan selubung kaya-H yang masif (Yamanaka, Fujii, and Nagayama 2023); 3. Massa bintang helium (He-star) berkorelasi dengan luminositas nya, yang mengendalikan kekuatan angin bertenaga radiasi yang menjadi asal mula dari kehilangan massa akibat angin berikutnya. Untuk massa inti He yang rendah, laju kehilangan massa akibat angin juga lemah dan mungkin tidak menyebabkan kehilangan massa yang signifikan. Karena massanya rendah dan kaya helium, bintang progenitor semacam ini dapat meledak sebagai supernova Tipe Ib, atau

sebagai supernova Tipe IIb jika masih terdapat sisa hidrogen di permukaan. Tergantung pada laju kehilangan massa, angin dari bintang helium bermassa lebih tinggi mungkin atau mungkin tidak mampu melepaskan lapisan luar yang kaya helium, dan menghasilkan supernova Tipe Ic, dengan asumsi bahwa kekurangan helium merupakan syarat utama untuk klasifikasi Tipe Ic (Dessart et al. 2020).

Dalam percobaan ini, lima planet terdekat yang akan dianalisis adalah merkurius, venus, bumi, mars, dan jupiter. Merkurius adalah planet terdekat dengan Matahari dan merupakan benda terrestrial anggota akhir dalam hal struktur internal dan komposisi permukaan dalam tata surya kita. Pada artikel karya (Solomon and Byrne 2019) dijelaskan bahwa, Merkurius telah dieksplorasi baik oleh teleskop berbasis Bumi maupun oleh dua misi pesawat ruang angkasa NASA: Mariner 10 (1974–1975) dan MESSENGER (2008–2015). Misi ketiga ke Merkurius, Bepi Colombo, diluncurkan oleh Badan Antariksa Eropa (ESA) dan Badan Antariksa Jepang (JAXA) pada tanggal 20 Oktober 2018 dan akan mencapai orbit Merkurius pada tahun 2025. Dalam artikel ini, kami mengulas karakteristik utama struktur interior dan permukaan Merkurius, dengan fokus pada ukuran dan komposisi berbagai lapisan planet ini yang memiliki sejarah awal yang didominasi oleh diferensiasi melalui pemisahan inti mantel yang diikuti oleh pematatan magma-samudera, aktivitas vulkanik, kawah, dan pelelehan akibat tumbukan. Semua proses ini mengarah pada struktur Merkurius saat ini.

Karakteristik Merkurius yang paling mencolok, selain ukurannya yang kecil, adalah fraksi massa yang relatif besar yang diwakili oleh inti (65% dari total massa planet). Merkurius juga memiliki kerak yang tebal (35km) dibandingkan dengan ukuran mantel (400 km) dan, mungkin, lapisan FeS pada batas inti-mantel. Inti bagian dalam padat, inti bagian luar cair. Sedangkan menurut (Nittler et al. 2018) komposisi permukaan Merkurius juga unik, dengan kandungan besi yang sangat rendah tetapi kandungan sulfur yang tinggi, yang menunjukkan kondisi yang sangat reduksi selama diferensiasi planet.

Venus sangat panas saat ini. Secara harfiah, atmosfernya yang besar dan kaya CO₂ menciptakan efek rumah kaca yang membuat permukaannya menjadi yang terpanas di Tata Surya secara rata-rata. Secara kiasan, Venus semakin populer setelah pengumuman baru-baru ini bahwa NASA dan Badan Antariksa Eropa (ESA) akan mengirim tiga misi baru ke planet saudara Bumi. Misi-misi yang mampu ini Veritas, Davinci, dan EnVision akan membantu mengakhiri kekeringan selama tiga puluh tahun ketika kunjungan ke Venus jarang terjadi anomali historis. Secara keseluruhan, lebih dari empat puluh misi telah diluncurkan dengan Venus

dalam rencana perjalanan mereka (misalnya, Taylor et al. 2018) hampir sama dengan jumlah total yang telah dikirim ke Mars. Namun, misi terakhir yang dipimpin NASA ke Venus (Magellan) jatuh ke atmosfer pada tahun 1994 setelah menyelesaikan kampanye pemetaan radar yang berhasil. Sejak saat itu, Venus relatif sepi, hanya menjadi tempat bagi tiga wahana antariksa lintas (Messenger, Galileo, Dan Cassini) dan dua wahana pengorbit (Venus Express dan Akatsuki, yang masih beroperasi hingga tahun 2023). Dalam tiga dekade terakhir, data wahana antariksa dari Venus membantu menjelaskan cara kerja atmosfer modern nya dan mengisyaratkan masa lalunya (O'Rourke et al. 2023).

Bumi, planet asal kita, adalah dunia yang tidak ada duanya. Planet ketiga dari matahari, Bumi adalah satu-satunya tempat di alam semesta yang diketahui yang dipastikan memiliki kehidupan. Dengan radius 3.959 mil, Bumi adalah planet terbesar kelima di tata surya kita, dan satu-satunya yang diketahui pasti memiliki air cair di permukaannya. Bumi juga unik dalam hal julukan. Setiap planet tata surya lainnya diberi nama berdasarkan dewa Yunani atau Romawi, tetapi setidaknya selama seribu tahun, beberapa budaya telah menggambarkan dunia kita menggunakan kata Jermanik "bumi," yang berarti "tanah" (Pieri and Dziewonski 2014).

Mars adalah planet yang paling mirip Bumi dalam tata surya kita karena menunjukkan determinan fisik yang sebanding seperti radius, massa, dan suhu, serta penanda fisikokimia seperti energi yang tersedia, stabilitas substrat, kimia yang sesuai, dan stabilitas cairan masa lalu. Selain itu, regolith Mars dan bawah permukaannya mengandung air dalam keadaan beku dan mungkin dalam keadaan cair atau cair sementara; Mars memiliki gravitasi permukaan sedang untuk memungkinkan kolonisasi di masa mendatang; dan iklim Mars, meskipun keras, secara teoritis masih dapat mendukung bentuk kehidupan yang serupa dengan ekstremofil terrestrial (Bhardwaj et al. 2022). Kepadatan Mars yang tidak terkompresi (tekanan nol) adalah 5,4 g/cm³, jauh lebih besar daripada kepadatan planet terrestrial lainnya (misalnya, 4,4 g/cm³ untuk Bumi dan Venus). Kepadatan tinggi ini dengan jelas menunjukkan kelimpahan yang lebih tinggi dari setidaknya satu fase berat, yang mana besi metalik sejauh ini merupakan kandidat yang paling masuk akal mengingat kelimpahannya yang tinggi dalam komposisi matahari massal. Dengan demikian, telah lama diketahui bahwa Mars pasti memiliki inti yang kaya akan besi metalik yang membentuk fraksi massa yang lebih besar daripada inti planet terrestrial lainnya (Dastidar et al. 2024).

Jupiter, planet terbesar dalam Sistem Tata Surya, memiliki sifat ilmiah yang unik karena interaksi

nya dengan sinar kosmik. Meskipun tidak memiliki permukaan padat, atmosfernya yang tebal dan medan magnet yang sangat kuat menjadikannya salah satu tempat alami untuk mempelajari gelombang kejut seperti supernova. Dalam konteks ini, Jupiter relevan bagi para astrofisika wan karena keberadaannya membantu menyimulasikan bagaimana partikel bermuatan tinggi, seperti proton dan helium, dipercepat oleh guncangan sebuah fenomena yang juga terjadi pada sisa-sisa supernova. Hal tersebut telah menunjukkan bahwa partikel-partikel ini dapat dipilih secara alami berdasarkan rasio massa terhadap muatannya, dan keberadaan atmosfer dan medan Jupiter memungkinkan simulasi yang lebih realistis dari unsur-unsur ini (Hanusch, Liseykina, and Malkov 2019).

Planet-planet terdekat, yaitu Merkurius, Venus, Bumi, Mars, dan Jupiter, memiliki karakteristik yang sangat berbeda dalam merespons fenomena kosmik seperti ledakan supernova. Menurut (Kamijima and Ohira 2024), ketika partikel bermuatan tinggi dipercepat secara siklis antara gelombang kejut supernova dan guncangan terminasi angin, planet-planet seperti Merkurius dan Mars yang memiliki atmosfer tipis dan medan magnet minimal akan cenderung lebih langsung terpapar partikel berenergi tinggi dan medan elektromagnetik spiral Parker. Venus, dengan atmosfer CO₂ nya yang padat, memiliki potensi untuk menyerap energi secara intensif, memperkuat pemanasan atmosfer. Sementara itu, Bumi dengan medan magnet dan perlindungan atmosfernya yang kompleks menunjukkan respons yang lebih dinamis tetapi cenderung terlindungi. Jupiter, sebagai planet dengan massa dan medan magnet yang sangat besar, sebenarnya dapat bertindak sebagai perisai raksasa yang membelokkan partikel-partikel energik dari ruang antar bintang, yang memengaruhi distribusi energi dalam Sistem Tata Surya.

Gelombang kejut maju dan balik dari supernova Tipe II dapat memberikan dampak diferensial terhadap planet-planet tersebut, bergantung pada posisi dan strukturnya. Planet tanpa perlindungan atmosferik atau magnetik, seperti Merkurius dan Mars, akan mengalami dampak langsung dari peningkatan radiasi dan tekanan partikel. Venus akan mengalami gangguan lapisan atmosfer atas akibat interaksi dengan sinar bebas energi tinggi, sedangkan Bumi berpotensi mengalami perubahan dalam ionosfer dan radiasi kosmik meskipun permukaan relatif aman. Jupiter, karena skalanya yang cukup besar, dapat berfungsi sebagai alat secara astrofisika alami untuk meniru efek turbulensi dan tekanan gelombang kejut, sehingga memungkinkan studi sinar kosmik secara lebih menyeluruh. Medan magnet pada Jupiter menjadikannya sebagai planet

yang ideal untuk memahami proses seleksi alami partikel berdasarkan rasio massa-muatan dalam mekanisme percepatan kejut. Dalam hal ini, Jupiter tidak hanya menjadi pelindung bagi planet-planet bagian dalam, tetapi juga menjadi medan uji untuk model percepatan kosmik, serupa dengan kondisi di sekitar sisa supernova. Sementara itu, planet-planet dalam seperti Bumi dan Mars dapat memberikan wawasan tentang bagaimana lingkungan planet padat berinteraksi dengan gelombang kejut dan fluks partikel tinggi. Ketimpangan dalam struktur dan medan antar planet menciptakan spektrum reaksi yang luas, memungkinkan kita memahami dinamika kosmik tidak hanya sebagai fenomena bintang, tetapi juga dalam konteks planet sebagai Sistem Tata Surya penerima dampak ledakan supernova (Tsuna, Kashiya, and Shigeyama 2019).

Metode

Penelitian ini dilaksanakan dengan menggunakan pendekatan deskriptif kualitatif yang didukung oleh simulasi berbasis komputer untuk menggambarkan secara visual dan konseptual proses terjadinya ledakan supernova. Penelitian ini bertujuan untuk memahami secara menyeluruh penyebab utama terjadinya supernova, tahapan-tahapan fisika yang terjadi selama proses ledakan, serta dampak dari fenomena tersebut terhadap ruang antar bintang. Untuk mencapai tujuan tersebut, penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan sistematis, yaitu studi literatur, perancangan simulasi, implementasi program simulasi, dan analisis hasil visualisasi.

Studi Literatur

Tahap awal penelitian ini diawali dengan pengumpulan referensi ilmiah yang relevan dari berbagai sumber, seperti jurnal ilmiah internasional, artikel daring terpercaya, serta makalah-makalah konferensi. Studi literatur ini dilakukan untuk memperoleh pemahaman mendalam mengenai teori dasar pembentukan supernova, faktor-faktor penyebab terjadinya ledakan, proses evolusi bintang bermassa besar, dan fenomena fisika yang menyertainya seperti keruntuhan gravitasi, pembentukan gelombang kejut, serta pembentukan benda langit baru seperti bintang neutron atau lubang hitam. Selain itu, kajian literatur juga digunakan sebagai dasar dalam menyusun parameter dan skenario simulasi yang akan dibuat. Adapun data-data kelima planet terdekat yang akan dianalisis disajikan pada Tabel 1 sebagai berikut:

Tabel 1. Data Planet

	Mercurys	Venus	Bumi	Mars	Jupiter
Mass (10^{24} kg)	0.330	4.87	5.97	0.642	1898
Diameter (km)	4879	12,104	12,756	6792	142,984
Density (kg/m^3)	5429	5243	5514	3934	1326
Gravity (m/s^2)	3.7	8.9	9.8	3.7	23.1
Escape Velocity (km/s)	4.3	10.4	11.2	5.0	59.5
Rotation Period (hours)	1407.6	-5832.5	23.9	24.6	9.9
Length of Day (hours)	4222.6	2802.0	24.0	24.7	9.9
Distance from Sun (10^6 km)	57.9	108.2	149.6	228.0	778.5
Perihelion (10^6 km)	46.0	107.5	147.1	206.7	740.6
Aphelion (10^6 km)	69.8	108.9	152.1	249.3	816.4
Orbital Period (days)	88.0	224.7	365.2	687.0	4331
Orbital Velocity (km/s)	47.4	35.0	29.8	24.1	13.1
Orbital Inclination (degrees)	7.0	3.4	0.0	1.8	1.3
Orbital Eccentricity	0.206	0.007	0.017	0.094	0.049
Obliquity to Orbit (degrees)	0.034	177.4	23.4	25.2	3.1
Mean Temperature (C)	167	464	15	-65	-110
Surface Pressure (bars)	0	92	1	0.01	-
Number of Moons	0	0	1	2	95
Ring System?	No	No	No	No	Yes
Global Magnetic Field?	Yes	No	Yes	No	Yes

Perancangan Simulasi

Setelah memperoleh landasan teoritis yang memadai, tahap selanjutnya adalah merancang simulasi komputer sebagai alat bantu visualisasi. Simulasi dirancang menggunakan bahasa pemrograman Python karena fleksibilitasnya dalam pemrosesan data numerik dan grafik. Lingkungan pengembangan yang digunakan adalah Visual Studio Code (VS Code) yang mendukung berbagai ekstensi untuk pemrograman sains. Pada tahap ini, peneliti menentukan komponen-komponen utama simulasi, seperti input parameter fisika (massa bintang, suhu inti, radius), waktu simulasi, dan urutan proses visualisasi. Beberapa library Python yang digunakan dalam simulasi ini meliputi: *Numpy* Numpy yang digunakan untuk melakukan perhitungan numerik seperti penghitungan tekanan, gaya gravitasi, dan densitas energi. *Matploib* Matplotlib yang digunakan untuk membuat grafik visualisasi serta animasi proses ledakan melalui modul *matplotlib Animation*.

Implementasi Program Simulasi

Setelah rancangan selesai, langkah selanjutnya adalah implementasi kode program simulasi. Dalam tahap ini, peneliti menyusun alur logika simulasi berdasarkan proses fisika yang telah dipelajari. Simulasi dimulai dari kondisi awal di mana sebuah bintang bermassa besar telah kehabisan bahan bakar inti dan tidak lagi mampu menahan gaya gravitasi internalnya. Selanjutnya, program akan menampilkan proses keruntuhan inti secara tiba-tiba, pembentukan gelombang kejut ke arah luar, serta pelepasan energi yang sangat besar sebagai ciri utama dari ledakan supernova. Visualisasi tersebut diatur dalam bentuk

animasi dua dimensi dengan perubahan warna, ukuran, dan intensitas cahaya untuk merepresentasikan transformasi energi dan materi selama proses berlangsung. Program dijalankan secara berulang untuk memastikan konsistensi hasil dan kestabilan tampilan visualisasi.

Analisis Hasil Ledakan Supernova

Tahap terakhir dari penelitian ini adalah melakukan analisis terhadap hasil simulasi yang telah dihasilkan. Analisis dilakukan secara kualitatif dengan membandingkan hasil visualisasi dengan teori yang ditemukan dalam studi literatur. Peneliti mengamati setiap fase dalam simulasi, mulai dari tahap awal keruntuhan inti hingga dampak pelepasan materi dan energi ke lingkungan sekitar bintang.

Penilaian dilakukan berdasarkan seberapa akurat simulasi mampu merepresentasikan fenomena-fenomena seperti pelepasan sinar gamma, pembentukan unsur berat seperti besi dan nikel, dan efek residual berupa kabut supernova (supernova remnant). Selain itu, hasil visualisasi juga digunakan untuk menjelaskan proses terbentuknya objek-objek sisa seperti bintang neutron atau lubang hitam, tergantung pada massa akhir inti bintang. Dengan melalui berbagai tahapan tersebut, penelitian ini tidak hanya menyajikan gambaran teoritis mengenai supernova, tetapi juga memberikan alat bantu visual yang mendekati representasi nyata dari peristiwa kosmis tersebut, sehingga dapat menjadi sarana pembelajaran dan pengembangan pemahaman dalam bidang astrofisika modern.

Hasil dan Pembahasan

Pemahaman Mengenai Energi Yang Diterima Planet Akibat Ledakan Supernova

Supernova merupakan salah satu fenomena kosmik paling destruktif dan spektakuler yang terjadi ketika sebuah bintang masif mencapai akhir siklus hidupnya. Ketika proses fusi nuklir tidak lagi dapat menopang tekanan gravitasi internal, inti bintang mengalami keruntuhan gravitasi secara tiba-tiba. Proses ini menghasilkan gelombang kejut internal yang mendorong lapisan luar bintang ke luar angkasa dengan kecepatan sangat tinggi, disertai pelepasan energi dalam jumlah yang luar biasa besar. Total energi yang dilepaskan dalam satu ledakan supernova dapat mencapai sekitar 1044 Joule, jumlah yang setara dengan energi total yang akan dipancarkan oleh Matahari selama lebih dari 10 miliar tahun masa hidupnya.

Energi dari supernova tersebar ke segala arah dalam bentuk gelombang bola yang terdiri atas berbagai komponen, seperti radiasi elektromagnetik (dari sinar gamma hingga gelombang radio), neutrino, dan semburan partikel bermassa tinggi. Meskipun secara global energi ini tampak menyebar merata, dalam skala lokal, intensitas energi yang diterima oleh objek tertentu sangat bergantung pada posisi relatif terhadap pusat ledakan. Dengan kata lain, distribusi energi ini mengikuti prinsip geometris yang sederhana: semakin dekat suatu objek ke pusat supernova, semakin besar fraksi energi yang diterimanya per satuan luas permukaan. Salah satu faktor utama yang menentukan dampak energi supernova terhadap suatu planet adalah jaraknya dari pusat ledakan. Intensitas energi yang diterima akan berkurang secara kuadrat terhadap jarak, mengikuti hukum invers kuadrat. Planet-planet dalam tata surya yang berada lebih dekat ke bintang yang meledak jika, misalnya, ledakan terjadi dalam lingkungan lokal galaksi kita akan mengalami paparan energi yang jauh lebih tinggi dibandingkan planet yang lebih jauh.

Hal ini menimbulkan perbedaan efek fisik yang signifikan, seperti peningkatan suhu, radiasi ionisasi tinggi, dan bahkan pengikisan atmosfer. Namun, jarak bukan satu-satunya faktor penentu. Ukuran planet juga memiliki peranan penting dalam menentukan dampak total energi yang diterima. Luas penampang planet (yang secara kasar bergantung pada kuadrat jari-jari planet) menentukan seberapa besar energi gelombang supernova yang diserapnya. Planet seperti Jupiter, yang memiliki jari-jari besar, akan menyerap lebih banyak energi hanya karena ukurannya, meskipun jaraknya mungkin lebih jauh dari sumber ledakan dibanding planet seperti Mars atau Bumi. Di samping ukuran, massa planet berkontribusi terhadap kapasitas planet dalam merespons energi yang masuk. Planet bermassa

besar memiliki gravitasi yang kuat, sehingga dapat mempertahankan atmosfer dan memitigasi efek dari radiasi dan partikel energik.

Gravitasi yang kuat juga memungkinkan planet menyerap dan menyebarkan energi secara internal lebih stabil. Sebaliknya, planet bermassa kecil atau tanpa atmosfer cenderung mengalami kerusakan langsung seperti penguapan lapisan permukaan, pelepasan atmosfer, atau peningkatan suhu permukaan yang ekstrem. Atmosfer planet menjadi lapisan pelindung krusial dalam menentukan dampak akhir dari paparan energi supernova. Atmosfer padat dan berlapis seperti yang dimiliki Bumi atau Jupiter mampu menyerap dan menyebarkan radiasi elektromagnetik tinggi secara efisien, mengurangi penetrasi langsung ke permukaan. Planet seperti Mars yang atmosfernya sangat tipis hanya memiliki perlindungan minim, sehingga radiasi dapat langsung mencapai permukaan dan mengionisasi molekul. Untuk planet seperti Merkurius yang hampir tidak memiliki atmosfer, energi dari supernova dapat menyebabkan pelapukan permukaan secara langsung tanpa hambatan, menunjukkan betapa ekstremnya komposisi planet terhadap bencana kosmik.

Konsep Energi Yang Digunakan

Untuk mengetahui seberapa besar energi yang diterima oleh planet akibat gelombang ledakan supernova, pendekatan fisika yang digunakan dalam simulasi ini berakar pada prinsip dasar dinamika Newton dan konsep Energi Kinetik. Energi yang diterima sebuah planet dapat dianggap sebagai energi kinetik yang ditransfer oleh gelombang partikel atau radiasi dari ledakan supernova ke sistem planet tersebut. Alasan penggunaan konsep Energi Kinetik adalah:

Gelombang Supernova Menghasilkan Aliran Partikel dan Radiasi Berenergi Tinggi yang Bergerak dengan Cepat

Akibat ledakan Supernova melepaskan energi dalam bentuk gelombang kejut, sinar gamma, neutrino, dan partikel bermuatan yang sangat energik. Semua komponen ini bergerak mendekati kecepatan cahaya dan membawa energi yang sangat besar, mampu menempuh jarak antar bintang dan tetap signifikan saat mencapai sistem planet yang jauh. Kecepatan dan energi tinggi ini menyebabkan interaksi yang tidak bisa diabaikan terhadap objek-objek yang dilewatinya, termasuk atmosfer dan permukaan planet. Karena kecepatan partikel sangat tinggi, pendekatan energi kinetik menjadi metode yang tepat untuk mengukur dampaknya. Secara keilmuan fisika, energi kinetik mencerminkan seberapa besar energi gerak yang dimiliki suatu objek atau partikel. Dengan

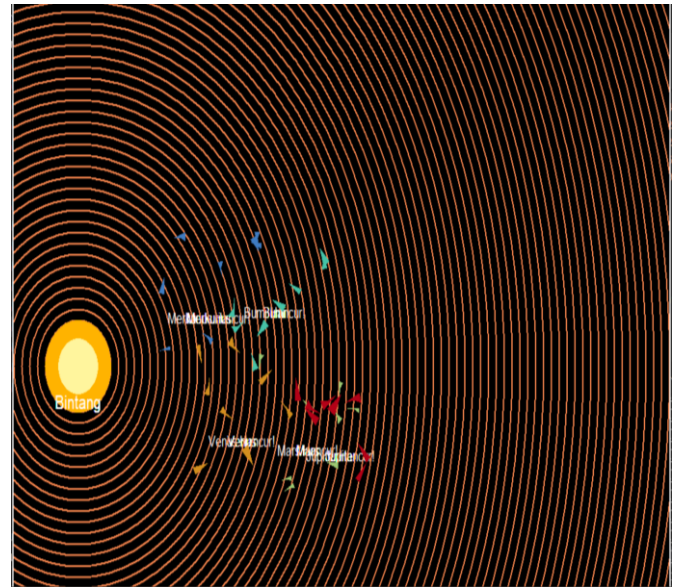
mengasumsikan bahwa sebagian besar energi dari gelombang supernova berpindah sebagai energi kinetik ke materi di planet (seperti atmosfer atau tanah), kita dapat menghitung dampak fisis secara kuantitatif. Inilah alasan mengapa pendekatan ini dipilih untuk menilai efek langsung gelombang supernova pada planet target dalam simulasi.

Gambar 1 menampilkan hasil simulasi numerik dari sebuah ledakan supernova yang melibatkan satu bintang masif dan lima planet: Merkurius, Venus, Bumi, Mars, dan Jupiter. Dalam simulasi ini, proses keruntuhan inti bintang menyebabkan pelepasan energi dalam jumlah yang sangat besar, memicu lontaran lapisan luar bintang dengan kecepatan tinggi ke segala arah. Visualisasi tersebut secara eksplisit memperlihatkan gelombang kejut yang merambat menjauhi inti bintang, membawa serta material panas dan padat yang sebelumnya membentuk struktur bintang. Efek ini menjadi awal dari interaksi antara sisa bintang dan planet-planet di sekitarnya. Interaksi tersebut kemudian terlihat dalam bentuk hantaman gelombang energi terhadap masing-masing planet. Planet yang berada pada posisi lebih dekat dengan pusat ledakan, seperti Venus dan Bumi, menunjukkan reaksi yang lebih kuat terhadap gelombang tersebut. Energi yang besar menyebabkan gangguan besar pada struktur planet, mulai dari perubahan orbit hingga kehancuran sebagian permukaannya. Visualisasi ini menekankan bahwa dampak supernova tidak hanya sebatas fenomena cahaya terang, tetapi juga mampu secara nyata memengaruhi keberadaan objek lain di sekitarnya.

Simulasi juga memperlihatkan variasi respons antar planet terhadap energi ledakan. Jupiter, meskipun posisinya lebih jauh, tetap menerima dampak yang signifikan karena ukurannya yang sangat besar memungkinkan penyerapan lebih banyak energi di permukaannya. Sebaliknya, Mars dan Merkurius menunjukkan efek yang lebih kecil, baik karena ukurannya yang kecil maupun posisinya yang tidak sepenuhnya sejajar dengan arah ledakan. Fenomena ini memperjelas bahwa faktor jarak, ukuran planet, dan posisi relatif terhadap arah gelombang ledakan memengaruhi besarnya dampak yang diterima. Secara keseluruhan, simulasi dalam Gambar 1 memberikan gambaran visual yang kuat tentang bagaimana ledakan supernova memengaruhi lingkungan kosmis di sekitarnya. Tidak hanya menciptakan gangguan fisik bagi planet-planet di dekatnya, ledakan ini juga menunjukkan potensi untuk menyebarkan berbagai unsur berat ke seluruh penjuru ruang angkasa.

Simulasi seperti ini sangat penting dalam memahami asal-usul materi di alam semesta serta bagaimana peristiwa bintang mati dapat meninggalkan

jejak fisik dan dinamika baru bagi sistem planet yang mengelilinginya. Melalui pendekatan visual dan numerik, simulasi membantu memperjelas proses-proses ekstrem yang membentuk evolusi struktur di alam semesta.



Gambar 1. Planet yang hancur akibat ledakan supernova, menunjukkan efek langsung dari energi yang dilepaskan. Simulasi ini memberikan gambaran yang jelas tentang bagaimana supernova dapat mempengaruhi lingkungan di sekitarnya dan berkontribusi pada pembentukan elemen baru di alam semesta.

Planet Dapat Dimodelkan Sebagai Tumbukan atau Transfer Data

Ketika gelombang partikel dari ledakan supernova mencapai sebuah planet, mereka akan bertumbukan dengan partikel atmosfer atau bahkan material padat di permukaan planet. Interaksi ini secara fisis sangat mirip dengan tumbukan antara dua objek, di mana momentum dan energi ditransfer dari satu sistem ke sistem lainnya. Dalam mekanika klasik, interaksi semacam ini dapat dihitung dengan hukum kekekalan momentum dan hukum kekekalan energi, di mana energi kinetik memainkan peran penting sebagai ukuran energi sebelum dan sesudah tumbukan.

Model ini memungkinkan kita untuk memperkirakan dampak aktual seperti pemanasan atmosfer, pelepasan partikel, atau bahkan gangguan struktural jika energinya cukup besar. Dalam pendekatan diferensial, kita menghitung transfer energi ini secara berkelanjutan dalam skala waktu kecil (misalnya mikrodetik hingga detik), sehingga efek kumulatif dari ledakan bisa dianalisis secara dinamis.

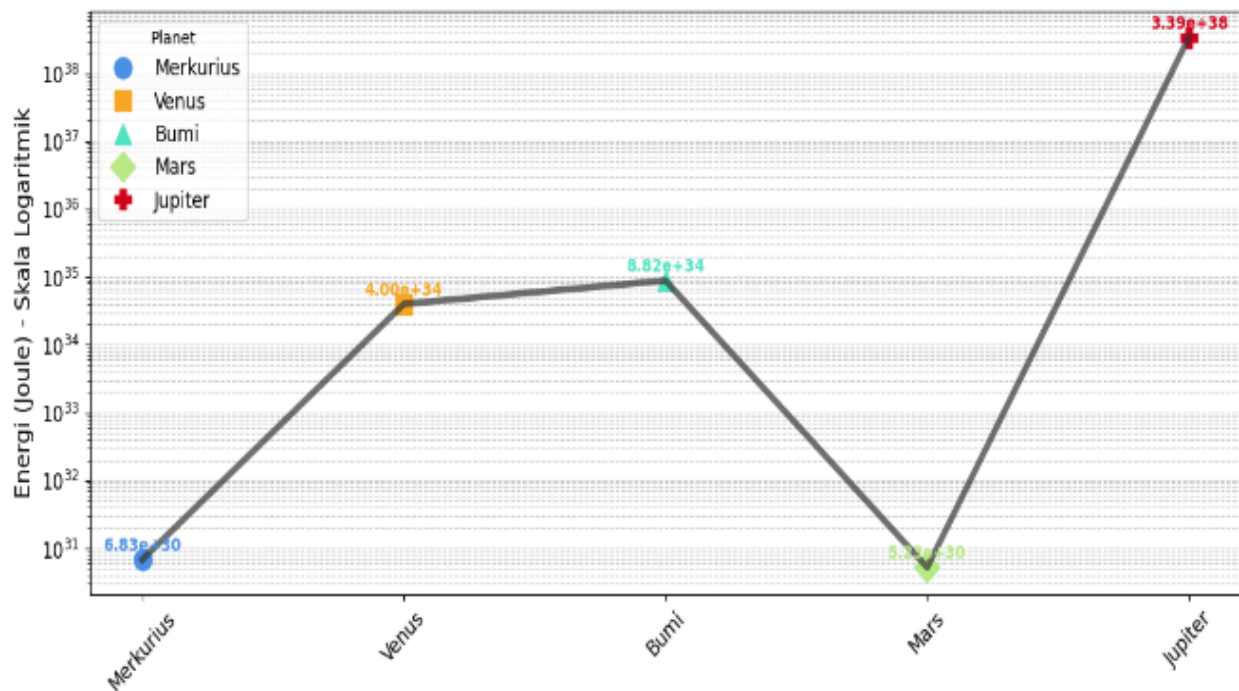
Hal ini membuat pendekatan energi kinetik sangat cocok untuk menyimulasikan efek waktu nyata dari paparan radiasi dan partikel supernova terhadap struktur planet yang kompleks.

Pendekatan Memungkinkan Analisis Detail Terhadap Perubahan Energi

Ketika gelombang partikel dari ledakan supernova mencapai sebuah planet, mereka akan bertumbukan dengan partikel atmosfer atau bahkan material padat di permukaan planet. Interaksi ini secara fisis sangat mirip dengan tumbukan antara dua objek, di mana momentum dan energi ditransfer dari satu sistem ke sistem lainnya. Dalam mekanika klasik, interaksi semacam ini dapat dihitung dengan hukum kekekalan momentum dan hukum kekekalan energi, di mana energi kinetik memainkan peran penting sebagai ukuran energi sebelum dan sesudah tumbukan. Model ini memungkinkan kita untuk memperkirakan dampak aktual seperti pemanasan atmosfer, pelepasan partikel, atau bahkan gangguan struktural jika energinya cukup besar. Dalam pendekatan diferensial, kita menghitung transfer energi ini secara berkelanjutan dalam skala waktu kecil (misalnya mikrodetik hingga detik), sehingga efek kumulatif dari ledakan bisa dianalisis secara dinamis. Hal ini membuat pendekatan energi kinetik sangat cocok untuk menyimulasikan efek waktu nyata dari paparan radiasi dan partikel supernova terhadap struktur planet yang kompleks.

Gambar 2 menampilkan grafik perbandingan energi yang diterima oleh lima planet Merkurius, Venus, Bumi, Mars, dan Jupiter akibat ledakan supernova. Sumbu horizontal (X) merepresentasikan nama-nama planet, sedangkan sumbu vertikal (Y) menunjukkan besar energi dalam satuan Joule yang ditampilkan pada skala logaritmik. Setiap planet diberi warna dan simbol berbeda untuk membedakan masing-masing titik data. Dari grafik terlihat bahwa Jupiter menerima energi paling besar, dengan nilai sekitar 3.39×10^{38} Joule. Angka ini ditampilkan pada puncak grafik, ditandai dengan simbol "+" berwarna merah. Sementara itu, Merkurius dan Mars menerima energi yang jauh lebih kecil, masing-masing sebesar 6.83×10^{30} dan 5.23×10^{30} Joule, terlihat berada di bagian bawah grafik.

Venus dan Bumi berada pada posisi tengah, dengan Venus menerima 4.00×10^{34} Joule dan Bumi menerima 8.82×10^{34} Joule. Keduanya ditampilkan dengan simbol kotak dan segitiga, masing-masing berwarna oranye dan cyan. Posisi titik-titik ini menunjukkan perbedaan yang cukup mencolok antarplanet, meskipun nilainya masih berada dalam satuan 10^{40} Joule ke bawah. Secara visual, garis penghubung antar titik memperjelas tren perbedaan energi antarplanet. Skala logaritmik yang digunakan juga membantu menampilkan perbedaan energi yang sangat besar secara proporsional.



Gambar 2. Perbandingan Energi yang Diterima oleh Planet dari Ledakan Supernova. Perbandingan Energi dalam Joule untuk Merkurius, Venus, Bumi, Mars, dan Jupiter.

Penurunan Persamaan Energi Kinetik Secara Differensial Hukum Kedua Newton

Perlu diperhatikan bahwa konsep Hukum Kedua Newton sangat diperhatikan dalam konsep ini. Dimana secara matematis Hukum Kedua Newton menyatakan:

$$F = m \cdot a = m \cdot \frac{dv}{dt}$$

Persamaan ini akan menjadi dasar untuk memahami bagaimana gaya dari gelombang energi memengaruhi gerak atau percepatan partikel atmosfer atau struktur planet yang terkena dampak ledakan. Kemudian, kita akan memakai konsep usaha sebagai transfer energi. Usaha yang dilakukan oleh gaya F terhadap perpindahan dx dapat dinyatakan sebagai:

$$dW = F \cdot dx$$

Hal ini mendefinisikan bahwa jika gaya dari ledakan yang ditimbulkan dapat menyebabkan perpindahan partikel sehingga terjadi transfer energi yang di asumsikan sebagai energi kinetik.

Hubungan Antara Kecepatan dan Perpindahan

Dapat diketahui bahwa $v = \frac{dx}{dt}$ (3), maka $dx = v dt$ (4). Substitusi ke persamaan (4) ke persamaan (2), maka hasil yang didapat adalah:

$$dW = F \cdot v dt$$

Persamaan tersebut dapat menyatakan bahwa laju usaha sangat bergantung pada besar gaya dan kecepatan partikel yang akan dikenai gaya dari ledakan supernova.

Substitusi Hukum Kedua Newton ke Persamaan Usaha

Dapat dilihat dari persamaan sebelumnya yaitu persamaan (1) dari Hukum Kedua Newton, akan disubstitusi ke dalam persamaan (5) dari usaha. Maka, kita akan memperoleh persamaan usaha yang baru yaitu:

$$dW = m \cdot \frac{dv}{dt} \cdot v \cdot dt = m \cdot v \cdot dv$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa perubahan energi kinetik yang terjadi dirumuskan sebagai hasil kerja gaya dari Persamaan tersebut menunjukkan bahwa perubahan energi kinetik yang

terjadi dirumuskan sebagai hasil kerja gaya dari gelombang terhadap kecepatan yang dikenai oleh gaya tersebut.

Integralkan agar Mendapat Persamaan Energi Kinetik

Dari persamaan sebelumnya yaitu persamaan (6), untuk mendapatkan energi total yang diterima dalam bentuk energi kinetik, persamaan tersebut akan diintegrasikan.

$$W = \int dW = \int m \cdot v \cdot dv = \frac{1}{2}mv^2$$

Persamaan diatas adalah bentuk umum dari energi kinetik. Dapat ditinjau bahwa besar energi yang ditransfer ke planet lain dalam bentuk gerakan partikel adalah proporsional terhadap massa dan kuadrat dari kecepatan akibat gelombang kejut yang terjadi.

Interpretasi Fisika Dalam Konteks Ledakan Supernova

Dalam simulasi ini, kecepatan v yang digunakan merepresentasikan kecepatan partikel atau gelombang radiasi saat mencapai atmosfer atau permukaan planet. Nilai massa m dapat dimodelkan sebagai massa efektif dari bagian planet yang terkena dampak langsung, seperti lapisan atmosfer tiap planet. Oleh karena itu, nilai energi $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ digunakan untuk menghitung energi kinetik yang diterima oleh planet, yang kemudian dicatat dalam Tabel 2 sebagai hasil akhir untuk setiap planet. Sebagai pembuktian, perhitungan dilakukan dengan mengambil satu contoh planet, yaitu Merkurius.

Planet Merkurius memiliki massa sekitar 3.30×10^{23} kg dengan kecepatan fragmennya sebesar 6.434 m/s. Berdasarkan data tersebut, energi kinetik yang diterima oleh planet dapat dihitung secara langsung menggunakan persamaan energi kinetik. Nilai energi yang diperoleh menunjukkan besarnya energi yang mungkin diserap oleh lapisan atmosfer atau permukaan planet akibat tumbukan partikel. Hasil perhitungan ini menjadi dasar untuk membandingkan tingkat paparan energi antarplanet serta memahami dampaknya terhadap karakteristik fisik dan dinamika atmosfer planet tersebut.

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

$$E_{k_{mercurius}} = 0,5 \times 3,30 \times 10^{23} \times (6,434)^2$$

$$E_{k_{mercurius}} = 0,5 \times 3,30 \times 10^{23} \times 41,396356$$

$$E_{k_{mercurius}} = 1,65 \times 10^{23} \times 4,139 \times 10^7$$

$$E_{\text{merkurius}} = 6,83 \times 10^{30} \text{ Joule}$$

Tabel 2. Besar Energi Setiap Planet Akibat Ledakan Supernova

Planet	Besar Energi (Joule)
Merkurius	6.83×10^{30}
Venus	4.00×10^{34}
Bumi	8.82×10^{34}
Mars	5.23×10^{30}
Jupiter	3.39×10^{38}

Ledakan supernova merupakan peristiwa kosmik yang sangat dahsyat dan melepaskan energi dalam jumlah luar biasa besar ke seluruh penjuru ruang. Energi ini menyebar sebagai gelombang kejut dan radiasi yang dapat mencapai planet-planet di sekitarnya. Dari hasil analisis, diketahui bahwa setiap planet menerima jumlah energi yang berbeda, tergantung pada seberapa besar ukuran planet tersebut dan seberapa jauh jaraknya dari pusat ledakan. Semakin besar planet dan semakin dekat posisinya, maka semakin besar pula energi yang diterima. Dalam simulasi yang dibuat dan melalui hasil grafik yang didapatkan, terlihat bahwa planet-planet seperti Jupiter, yang memiliki ukuran sangat besar, menerima energi paling besar dibandingkan planet lainnya. Di sisi lain, planet-planet kecil seperti Merkurius dan Mars menerima energi jauh lebih sedikit. Hal ini menunjukkan bahwa selain jarak, faktor fisik seperti radius atau luas permukaan planet berperan penting dalam menentukan seberapa besar energi supernova yang dapat diserap oleh suatu planet. Faktor atmosfer juga memengaruhi, terutama dalam menyerap atau memantulkan energi yang masuk. Hasil visualisasi dan grafik mendukung hasil percobaan bahwa dampak supernova terhadap planet tidak hanya bergantung pada seberapa dekat planet itu berada, tetapi juga pada karakteristik fisik masing-masing planet. Energi yang besar dapat menyebabkan gangguan besar pada planet, mulai dari perubahan atmosfer, pergeseran orbit, hingga kerusakan struktural. Percobaan ini memberi gambaran bahwa dalam skenario ledakan supernova yang cukup dekat, stabilitas dan eksistensi planet-planet di sekitarnya dapat terancam secara signifikan.

Kesimpulan

Dari hasil simulasi dan analisis dampak energi supernova menunjukkan bahwa dampaknya terhadap planet-planet dalam tata surya sangat dipengaruhi oleh jarak planet terhadap sumber ledakan serta karakteristik fisik planet tersebut. Melalui pendekatan diferensial terhadap energi kinetik, kita memperoleh gambaran yang komprehensif mengenai bagaimana partikel bermuatan dan radiasi elektromagnetik dari supernova

berinteraksi dengan atmosfer, medan magnet, dan struktur permukaan planet. Dari pendekatan ini, terlihat bahwa setiap planet merespons dengan cara yang berbeda terhadap tekanan energi yang tiba-tiba dan sangat besar ini.

Planet Merkurius, karena posisinya yang paling dekat dengan Matahari dan tidak memiliki atmosfer yang signifikan, menerima dampak paling ekstrem dari gelombang energi supernova. Tanpa lapisan pelindung atmosfer dan medan magnet, seluruh permukaan Merkurius langsung terpapar radiasi dan partikel bermuatan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa energi yang diserap mampu menghasilkan efek ablasi, yaitu penguapan langsung material dari permukaan akibat hantaman energi tinggi. Bahkan, batuan permukaan Merkurius dapat terionisasi atau mengalami pelelehan parsial akibat panas dan tekanan radiasi. Dalam skenario supernova yang cukup dekat, Merkurius secara teknis akan kehilangan sebagian massa permukaannya dalam waktu yang relatif singkat, dan sifat reflektif planet ini akan berubah secara drastis akibat permukaan yang rusak atau meleleh.

Venus, meskipun memiliki atmosfer yang sangat tebal dan padat, ternyata tidak serta-merta terlindungi sepenuhnya dari dampak supernova. Komposisi atmosfernya yang kaya karbon dioksida dan adanya awan asam sulfat menjadikannya sangat rentan terhadap efek ionisasi dan pemanasan yang ekstrem. Ketika gelombang partikel dan foton berenergi tinggi menembus atmosfer Venus, akan terjadi peningkatan suhu dan tekanan yang signifikan di lapisan atas atmosfer. Proses ini dapat menyebabkan hilangnya molekul-molekul penting melalui reaksi fotodisosi dan menciptakan ketidakseimbangan kimia jangka panjang. Bahkan, turbulensi dan gelombang kejut atmosferik yang dihasilkan dapat menciptakan badai termal berskala global. Hal ini berpotensi memicu redistribusi besar-besaran energi atmosfer, yang pada akhirnya memperburuk kondisi permukaan yang sudah ekstrem dan meningkatkan ketidakstabilan iklim planet ini.

Bumi, sebagai satu-satunya planet yang diketahui menopang kehidupan, memiliki sistem perlindungan yang relatif kompleks, termasuk atmosfer multilapis dan medan magnet global. Akan tetapi, meskipun perlindungan ini cukup efektif dalam kondisi normal, simulasi menunjukkan bahwa radiasi supernova yang kuat masih dapat menembus lapisan atmosfer bagian atas dan menyebabkan ionisasi masif pada ionosfer dan termosfer. Salah satu dampak utama yang dikhawatirkan adalah kerusakan lapisan ozon yang dapat mengakibatkan peningkatan drastis radiasi ultraviolet ke permukaan Bumi. Selain itu, gangguan terhadap medan magnet akibat arus partikel bermuatan dapat memicu badai geomagnetik, merusak satelit,

jaringan komunikasi, dan sistem listrik. Pada tingkat biologis, paparan radiasi tinggi juga meningkatkan risiko mutasi genetik dan gangguan kesehatan, yang dalam jangka panjang dapat mempengaruhi ekosistem secara menyeluruh.

Mars adalah contoh planet yang sangat rentan terhadap dampak astrofisika semacam ini karena atmosfernya yang sangat tipis dan medan magnet yang telah hilang sejak miliaran tahun lalu. Mars tidak memiliki mekanisme pertahanan alami yang signifikan, sehingga hampir seluruh energi kinetik dari partikel supernova akan langsung mengenai permukaannya. Efeknya bisa berupa penguapan molekul-molekul sisa atmosfer, pelepasan ion-ion dari permukaan tanah, serta pemanasan lokal yang bisa mengubah stabilitas struktur batuan. Dalam jangka panjang, paparan berulang dari radiasi kosmik seperti ini akan semakin mengikis atmosfer Mars dan memperburuk kondisinya untuk habitasi masa depan. Selain itu, jejak-jejak air yang masih tersimpan di bawah permukaan juga berpotensi mengalami perubahan fasa atau bahkan kehilangan jika partikel energetik menembus cukup dalam.

Jupiter, sebagai planet gas raksasa dengan medan magnet terkuat di tata surya, memiliki perlindungan alami yang sangat baik terhadap gangguan eksternal seperti ledakan supernova. Medan magnet Jupiter yang besar dapat membelokkan sebagian besar partikel bermuatan sebelum mencapai atmosfer bagian dalam. Namun, bukan berarti planet ini sepenuhnya aman. Energi supernova masih dapat menyebabkan gangguan pada lapisan ionosfer dan mengubah arsitektur medan magnetnya secara temporer. Efek lainnya adalah peningkatan aurora di kutub planet dan pelepasan energi dalam bentuk radiasi gelombang mikro dan sinyal radio yang intens. Lebih penting lagi, satelit-satelit alami Jupiter seperti Europa dan Ganymede, yang memiliki lapisan es dan lautan di bawah permukaan, dapat menerima dampak tidak langsung dari perubahan medan magnet induknya, yang berpotensi mempengaruhi kestabilan ekosistem mikro atau struktur kimianya.

Pendekatan matematis yang digunakan dalam studi ini, yakni penurunan rumus energi kinetik secara diferensial berdasarkan hukum Newton dan definisi usaha, terbukti memberikan keunggulan dalam menganalisis perubahan energi secara lokal dan dinamis. Model ini memungkinkan perhitungan energi yang sangat spesifik berdasarkan karakteristik tiap planet, termasuk kecepatan partikel, massa atmosfer, serta densitas medan magnet. Dengan pendekatan ini, studi dapat memetakan zona kerentanan planet secara akurat, baik untuk keperluan astrobiologi maupun perencanaan misi luar angkasa jangka panjang. Sebagai langkah antisipasi terhadap potensi bahaya supernova

di masa depan, penting untuk memiliki sistem pemantauan dan peringatan dini berbasis pengamatan terhadap bintang-bintang masif yang berisiko mengalami kolaps gravitasi. Dengan menggunakan data dari observatorium luar angkasa, posisi dan evolusi bintang-bintang ini dapat dimodelkan untuk memprediksi waktu dan lokasi terjadinya ledakan. Prediksi ini dapat digunakan untuk mempersiapkan sistem pelindung atau setidaknya melakukan tindakan mitigasi di Bumi maupun di instalasi luar angkasa.

Selain itu, pengembangan teknologi pelindung berbasis medan magnet buatan, pelapis anti radiasi, serta habitat tertutup menjadi sangat penting untuk menjamin keselamatan dalam misi luar angkasa. Teknologi ini juga dapat digunakan dalam orbit rendah Bumi (LEO) untuk melindungi satelit dan stasiun luar angkasa dari lonjakan radiasi. Di Bumi sendiri, menjaga keberlanjutan atmosfer, khususnya lapisan ozon, serta memperkuat sistem pemantauan terhadap gangguan elektromagnetik dan radiasi dari luar angkasa adalah kunci pertahanan terhadap peristiwa semacam ini.

Dengan pemahaman yang lebih dalam mengenai mekanisme transfer energi dari supernova ke planet-planet di tata surya, umat manusia dapat lebih siap menghadapi kemungkinan terjadinya peristiwa astrofisika ekstrem. Studi ini tidak hanya memberikan wawasan tentang risiko dan konsekuensi fisik, tetapi juga menekankan pentingnya integrasi ilmu fisika, astronomi, dan rekayasa teknologi untuk menciptakan solusi yang adaptif dan preventif terhadap bahaya luar angkasa. Pengetahuan ini sangat relevan dalam konteks eksplorasi planet, kelangsungan hidup jangka panjang di luar Bumi, serta kesiapsiagaan menghadapi perubahan lingkungan global akibat fenomena kosmik.

Ucapan Terimakasih

Penulis sangat berterimakasih kepada sesama rekan penulis yang saling terlibat dalam melakukan penelitian ini. Penulis juga sangat menghargai dukungan moral dan intelektual dari rekan-rekan penulis yang aktif berpartisipasi dalam diskusi dan memberikan berbagai masukan selama proses penyusunan artikel. Kolaborasi yang terjalin selama ini memberikan motivasi tambahan dan membantu memperluas sudut pandang dalam penyusunan artikel. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada institusi penyelenggara serta pihak-pihak terkait yang telah menyediakan fasilitas akademik dan lingkungan penelitian yang kondusif. Kondisi tersebut sangat menunjang kelancaran pelaksanaan percobaan serta pengembangan ide-ide yang dituangkan dalam naskah ini. Dengan segala bantuan dan dukungan tersebut, penulis dapat menyelesaikan artikel ini secara optimal. Semoga artikel ini dapat memberikan kontribusi yang bermanfaat dalam pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang astrofisika dan pemahaman dampak ledakan supernova terhadap planet-planet dalam sistem tata surya.

Daftar Pustaka

- Bhardwaj, A., Sam, L., Buchroithner, M. F., & Grau Galofre, A. (2022). Editorial: Advances in Mars research and exploration. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 9(8), 1–2. <https://doi.org/10.3389/fspas.2022.971104>
- Dastidar, R., Pignata, G., Dukiya, N., Misra, K., Hiramatsu, D., Silva-Farfán, J., Howell, D. A., Bostroem, K. A., Singh, M., Gangopadhyay, A., Kumar, A., & McCully, C. (2024). SN 2019nyk: A rapidly declining Type II supernova with early interaction signatures. *Astronomy and Astrophysics*, 685(A44), 1–18. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202348642>
- Dessart, L., Yoon, S. C., Aguilera-Dena, D. R., & Langer, N. (2020). Supernovae Ib and Ic from the explosion of helium stars. *Astronomy and Astrophysics*, 642(A106), 1–16. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038763>
- Hanusch, A., Liseykina, T. V., & Malkov, M. (2019). Acceleration of cosmic rays in supernova shocks: Elemental selectivity of the injection mechanism. *The Astrophysical Journal*, 872(1), 108. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aafdae>
- Kamijima, S. F., & Ohira, Y. (2024). Cosmic-ray acceleration in core-collapse supernova remnants with the wind termination shock. *Physical Review D*, 110(4), 1–16. <https://doi.org/10.1103/physrevd.110.043046>
- Liu, Z. W., Röpke, F. K., & Han, Z. (2023). Type Ia supernova explosions in binary systems: A review. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 23(8). <https://doi.org/10.1088/1674-4527/acd89e>
- Nittler, L. R., Chabot, N. L., Grove, T. L., & Peplowski, P. N. (2018). The chemical composition of Mercury. In *Mercury: The view after Messenger* (Vol. 2, pp. 30–51). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781316650684.003>
- O'Rourke, J. G., Wilson, C. F., Borrelli, M. E., Byrne, P. K., Dumoulin, C., Ghail, R., Gülcher, A. J. P., Jacobson, S. A., Korabely, O., Spohn, T., Way, M. J., Weller, M., & Westall, F. (2023). Venus, the planet: Introduction to the evolution of Earth's sister planet. *Space Science Reviews*, 219(1), 1–61. <https://doi.org/10.1007/s11214-023-00956-0>
- Pieri, D. C., & Dziewonski, A. M. (2014). *Earth as a planet: Surface and interior* (3rd ed.). Elsevier.
- Rodríguez, Ó. (2022). Luminosity distribution of Type II supernova progenitors. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 515(1), 897–913. <https://doi.org/10.1093/mnras/stac1831>
- Sadiq, S. (2024). Life cycle of high mass star. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences*, 97(1), 11–29.
- Solomon, S. C., & Byrne, P. K. (2019). The exploration of Mercury by spacecraft. *Elements*, 15(1), 15–20. <https://doi.org/10.2138/gselements.15.1.15>
- Svensmark, H. (2023). A persistent influence of supernovae on biodiversity over the Phanerozoic. *Ecology and Evolution*, 13(3), 1–9. <https://doi.org/10.1002/ece3.9898>
- Tsuna, D., Kashiyama, K., & Shigeyama, T. (2019). Type II supernova light curves powered by forward and reverse shocks. *The Astrophysical Journal*, 884(1), 87. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab40ba>
- Yamanaka, M., Fujii, M., & Nagayama, T. (2023). Bright Type II supernova 2023ixf in M101: A quick analysis of the early-stage spectra and near-infrared light curves. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 75(5), L27–L31. <https://doi.org/10.1093/pasj/psad051>