

Theoretical Analysis And Application Of The Dzhanibekov Effect In The Rotational Dynamics Of Rigid Bodies: A Systematic Literature Review

Analisis Teori Dan Aplikasi Efek Dzhanibekov Pada Dinamika Rotasi Benda Tegar: A Systematic Literature Review

Azmi Mustafa¹, Devi Khairina², Reivira Arafah³, Malik Alfatah Sembiring⁴, Dewi Wulandari⁵, Juniastel Rajagukguk⁶

Program Studi Pendidikan Fisika, Program Pascasarjana, Universitas Negeri Medan^{1,2,3,4,5,6}

Email: Azminustafa40@gmail.com¹, devikhairina894@gmail.com², reiviraarafah1917@gmail.com³, malikalfatah487@gmail.com⁴, dewiwulandari@unimed.ac.id⁵, juniastel@unimed.ac.id⁶

*Corresponding Author

Received : 10 April 2026, Revised : 15 Mei 2026, Accepted : 29 Juni 2026.

ABSTRACT

A triaxial rigid body spinning on its intermediate primary axis experiences a rotational instability phenomena called the Dzhanibekov Effect, sometimes referred to as the Tennis Racket Theorem. Because it draws attention to the shortcomings of the conservative paradigm represented by the standard Euler equations, this phenomena has grown in importance within the field of rigid body dynamics. Using a Systematic Literature Review (SLR) methodology, this study attempts to investigate the evolution of hypotheses and uses of the Dzhanibekov Effect. Information was gathered from international scientific publications and textbooks on classical mechanics that were released between 2024 and 2025. Identification, selection, extraction, and synthesis of pertinent study findings were used in the analysis. The findings show that whereas periodic flipping behaviour and intermediate-axis instability are successfully explained by the standard Euler equations, precession relaxation is not. According to recent research, the system is mostly driven toward a stable minimum-energy state by internal dissipation mechanisms, especially orientational diffusion. Moreover, elastic pendulum systems with slow-fast dynamics have shown Dzhanibekov-like behaviour, indicating that the phenomena is universal. By carefully adjusting the inertia tensor, intermediate-axis instability has been used in aerospace engineering to reorient spacecraft without the need for propellant. The Dzhanibekov Effect has been suggested in astrophysics as a process that underlies magnetar activity through gravitational wave emissions and X-ray bursts caused by Euler forces. This review shows how the Dzhanibekov Effect has developed from a concept in classical mechanics into a multidisciplinary phenomenon with important ramifications for astronomy, aeronautical engineering, and contemporary physics.

Keywords: *Nonlinear Dynamics, Rotational Stability, Euler Equations, Rigid Body Dynamics, Dzhanibekov Effect*

ABSTRAK

Efek Dzhanibekov, juga dikenal sebagai Theorem Bola Sepak Tennis, adalah fenomena ketidakstabilan rotasi yang terjadi pada benda tegar triaksial dengan momen inersia menengah ketika berotasi di sekitar sumbu. Karena fenomena ini menunjukkan keterbatasan model konservatif yang dikembangkan melalui persamaan Euler klasik, itu menjadi salah satu topik penting dalam dinamika benda tegar. Tujuan penelitian ini adalah untuk menyelidiki evolusi teori dan aplikasi Efek Dzhanibekov. Data dikumpulkan dari buku mekanika klasik dan artikel ilmiah internasional yang diterbitkan antara tahun 2024 dan 2025. Identifikasi, seleksi, ekstraksi, dan sintesis hasil penelitian yang relevan adalah cara analisis dilakukan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa persamaan Euler klasik dapat menjelaskan fenomena pemalihan orientasi dan ketidakstabilan sumbu tengah, tetapi belum dapat menjelaskan relaksasi precession. Studi baru menunjukkan bahwa mekanisme difusi orientasi internal, yang merupakan mekanisme disipasi internal yang paling penting dalam mengarahkan sistem ke keadaan stabil yang membutuhkan energi minimal. Fenomena Dzhanibekov juga ditemukan pada sistem bandul elastis yang memiliki karakteristik

dinamika yang lambat dan cepat. Ini menunjukkan bahwa fenomena ini berlaku secara universal. Ketidakstabilan sumbu tengah digunakan dalam teknologi antariksa untuk melakukan reorientasi satelit tanpa propelan dengan mengontrol tensor inersia. Selain itu, dalam bidang astrofisika, Efek Dzhani­bekov digunakan untuk menjelaskan aktivitas magnetar melalui mekanisme gaya Euler yang menghasilkan semburan sinar-X dan gelombang gravitasi. Kajian ini menunjukkan bahwa, dari konsep mekanika klasik, Efek Dzhani­bekov telah berkembang menjadi fenomena yang mencakup berbagai disiplin ilmu, dan memiliki dampak yang signifikan pada fisika modern, teknologi antariksa, dan astrofisika.

Kata Kunci: Efek Dzhani­bekov; Benda Tegar; Persamaan Euler; Stabilitas Rotasi; Dinamika Nonlinier

1. Pendahuluan

Salah satu bidang penting dalam mekanika klasik adalah dinamika rotasi benda tegar. Ini sangat penting untuk memahami perilaku sistem fisik, mulai dari objek laboratorium sederhana hingga objek astrofisika berskala besar. Fokus penelitian ini adalah bagaimana distribusi massa, momen inersia, momentum sudut, dan stabilitas gerak rotasi suatu benda berinteraksi satu sama lain. Persamaan Euler dapat digunakan untuk menjelaskan gerak rotasi benda tegar tanpa pengaruh torque eksternal. Persamaan ini masih menjadi dasar untuk menganalisis dinamika rotasi dalam banyak bidang ilmu fisika dan teknik. (Arya, 1997; Kleppner & Kolenkow, 2010).

Efek Dzhani­bekov, atau Theorem Bola Sepak Tennis, adalah salah satu fenomena yang menarik perhatian dalam dinamika rotasi benda tegar. Fenomena ini menunjukkan bahwa meskipun tidak ada torka eksternal yang mengganggu sistem, benda tegar triaksial yang berotasi di sekitar sumbu dengan momen inersia menengah akan mengalami ketidakstabilan, yang menyebabkan pembalikan orientasi secara berkala. Kosmonot Soviet Vladimir Dzhani­bekov pertama kali menyaksikan fenomena tersebut secara langsung pada tahun 1985 saat melakukan eksperimen kecil di stasiun luar angkasa Salyut 7. Setelah itu, temuan tersebut menjadi salah satu bukti empiris yang paling penting yang mendukung prediksi teoritis persamaan Euler tentang ketidakstabilan rotasi pada sumbu inersia tengah.

Secara teoritis, rotasi di sekitar sumbu dengan momen inersia terbesar atau terkecil bersifat stabil, tetapi rotasi di sekitar sumbu tengah tidak stabil terhadap gangguan kecil, menurut analisis stabilitas yang diperoleh dari persamaan Euler. Salah satu karakteristik Efek Dzhani­bekov adalah fenomena pembalikan orientasi, yang akan meningkat secara eksponensial. Meskipun teori klasik dapat menjelaskan mekanisme dasar ketidakstabilan, model konservatif dalam persamaan Euler, yaitu kecenderungan sistem untuk akhirnya berotasi stabil pada sumbu dengan momen inersia terbesar setelah mengalami beberapa pembalikan orientasi, tidak dapat menjelaskan fenomena precession relaxation.

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa metode dissipatif dapat mengatasi keterbatasan model Euler klasik. (De La Torre & Español, 2024) Mekanisme difusi orientasi dan viscoelasticitas berkontribusi pada proses disipasi energi internal, yang menghasilkan relaksasi precession. Hasil penelitian menunjukkan bahwa difusi orientasi menjadi mekanisme dominan yang mengarahkan vektor kecepatan sudut untuk sejajar dengan momentum sudut. Akibatnya, sistem dengan rotasi konstan pada sumbu mayor mencapai kondisi energi minimum. Hasil ini membuat kita lebih memahami bagaimana benda tegar bekerja, yang sebelumnya hanya dianggap sebagai sistem konservatif ideal.

Efek Dzhani­bekov tidak hanya memiliki nilai teoretis yang kuat, tetapi juga memiliki relevansi yang luas dalam berbagai bidang ilmu pengetahuan. (Benvenisty dkk., 2025) menemukan fenomena transisi yang mirip dengan Efek Dzhani­bekov pada sistem bandul elastis. Ini menunjukkan bahwa pola ketidakstabilan ini tidak terbatas pada sistem rotasi benda tegar. Rekayasa antariksa menggunakan ketidakstabilan sumbu tengah untuk mengubah orientasi satelit tanpa menggunakan propelan dengan mengendalikan tensor inersia secara optimal (Ostanin & Sperl, 2024) Selain itu, berdasarkan munculnya gaya Euler selama proses pembalikan

sumbu rotasi, Efek Dzhani­bekov, (Wada & Shimoda, 2024) dapat berfungsi sebagai salah satu cara untuk menjelaskan aktivitas semburan pada magnetar.

Sebagai hasil dari banyak penelitian, Efek Dzhani­bekov sekarang dianggap sebagai fenomena umum yang memiliki dampak luas pada sistem fisik dengan karakteristik nonlinier dan multiskala. Namun, temuan penelitian tersebut tersebar di berbagai disiplin ilmu, jadi diperlukan analisis yang menyeluruh untuk menghubungkan teori dasar mekanika klasik dengan temuan penelitian baru. Kajian literatur yang terintegrasi sangat penting untuk menemukan evolusi konsep, gap penelitian, dan peluang teori dan aplikasi Efek Dzhani­bekov di masa mendatang.

Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mempelajari secara menyeluruh tentang penelitian tentang Efek Dzhani­bekov pada dinamika rotasi benda tegar. Kajian ini dimulai dengan landasan teoritis yang berasal dari persamaan Euler, pengembangan model dissipatif untuk menjelaskan relaksasi precession, dan berbagai aplikasi kontemporer dalam sistem mekanik, teknik antariksa, dan astrofisika. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan pemahaman yang lebih baik tentang peran Efek Dzhani­bekov dalam.

2. Metode Penelitian

Metode *Systematic Literature Review (SLR)*, yang menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif, digunakan dalam penelitian ini. Metode ini dipilih untuk menemukan, mempelajari, mengevaluasi, dan mensintesis berbagai hasil penelitian tentang dinamika rotasi benda tegar, persamaan Euler, teorema bola tenis, dan efek Dzhani­bekov. Metode ini juga digunakan untuk mengembangkan aplikasinya dalam mekanika, teknik antariksa, dan astrofisika. Metode peninjauan literatur memungkinkan peneliti memperoleh pemahaman yang menyeluruh tentang evolusi konsep, hasil penelitian, dan tren penelitian tentang topik yang dikaji.

Sumber data penelitian berasal dari literatur klasik tentang mekanika dan artikel ilmiah yang berkaitan dengan topik penelitian. Karya-karya penting dalam literatur memberikan dasar teoritis untuk persamaan Euler dan dinamika benda tegar. (Arya, 1997; Kleppner & Kolenkow, 2010) Selain itu, artikel ilmiah yang dianalisis termasuk penelitian (Benvenisty dkk., 2025; De La Torre & Español, 2024; Ostanin & Sperl, 2024; Wada & Shimoda, 2024) yang membahas perkembangan terbaru Efek Dzhani­bekov dalam berbagai konteks.

Pengumpulan data dilakukan melalui penelusuran literatur dari berbagai basis data ilmiah bereputasi, seperti Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, dan IOP Science. Untuk mendapatkan data, kami menggunakan kata kunci seperti *rigid body dynamics*, *Euler equations*, *tennis racket theorem*, *efek Dzhani­bekov*, *rotational stability*, *precession relaxation*, *spacecraft attitude control*, dan *magnetar activity*. Literatur yang diperoleh kemudian diseleksi berdasarkan kesesuaian dengan fokus penelitian.

Kriteria inklusi dan eksklusi digunakan untuk memastikan bahwa literatur yang dianalisis relevan dan berkualitas untuk tujuan penelitian. Kriteria inklusi mencakup buku dan artikel ilmiah yang membahas persamaan Euler, dinamika rotasi benda tegar, dan Efek Dzhani­bekov sebagai fokus utama penelitian. Literatur yang dipilih berasal dari buku akademik dalam bidang mekanika dan fisika yang memiliki kredibilitas tinggi dan jurnal internasional yang terkenal. Selain itu, penelitian ini memprioritaskan artikel yang diterbitkan dari tahun 2024 hingga 2025. Hal ini dilakukan untuk menunjukkan kemajuan terbaru dalam teori, simulasi numerik, dan aplikasi Efek Dzhani­bekov dalam berbagai bidang. Selain itu, sumber yang dianalisis termasuk literatur yang mencakup pembahasan konseptual, model matematis, hasil simulasi, dan literatur yang membahas implementasi praktis dari fenomena tersebut. Untuk saat ini, standar eksklusi digunakan untuk menghilangkan sumber yang tidak relevan atau tidak memenuhi persyaratan akademik yang ditetapkan. Dalam proses analisis, literatur yang tidak memiliki hubungan langsung dengan dinamika rotasi benda tegar, serta Efek Dzhani­bekov, tidak disertakan. Selain itu, publikasi yang tidak memberikan penjelasan yang memadai tentang baik metodologi penelitian maupun hasil penelitian dikeluarkan dari penelitian karena berpotensi mengurangi

validitas sintesis yang dilakukan. Seluruh sumber yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari referensi yang berkualitas ilmiah dan dapat dipertanggungjawabkan secara akademis. Tidak ada literatur populer, opini, atau yang tidak melalui proses penelaahan sejawat (*peer review*).

Tiga tahap utama digunakan untuk melakukan analisis data: identifikasi, ekstraksi, dan sintesis. Pada tahap pertama, literatur yang memenuhi kriteria inklusi dikategorikan berdasarkan fokus penelitian. Pada tahap kedua, informasi penting dikumpulkan, seperti tujuan penelitian, kerangka teoritis, metode yang digunakan, hasil penelitian, dan kontribusi ilmiah dari masing-masing studi. Pada langkah sintesis, hasil dari berbagai literatur dibandingkan dan diintegrasikan untuk mendapatkan gambaran mendalam tentang evolusi teori dan aplikasi Efek Dzhani-bekov.

Untuk melakukan analisis secara tematik, hasil penelitian dikelompokkan ke dalam empat tema utama: (1) teori dasar dinamika benda tegar dan persamaan Euler, (2) mekanisme dissipatif dan fenomena *precession relaxation*, (3) analogi Efek Dzhani-bekov dengan sistem fisika lain, dan (4) aplikasi Efek Dzhani-bekov dalam teknologi antariksa dan astrofisika. Metode ini memungkinkan sintesis yang menghubungkan teori mekanika klasik dengan kemajuan penelitian kontemporer. Tujuannya adalah untuk menentukan kontribusi, kelemahan, dan peluang penelitian lanjutan pada bidang dinamika rotasi benda tegar.

3. Hasil dan Pembahasan

Perkembangan Teori Efek Dzhani-bekov dari Model Konservatif ke Model Dissipatif

Hasil penelitian literatur menunjukkan bahwa pemahaman tentang Efek Dzhani-bekov telah berubah secara signifikan dari pendekatan mekanika klasik yang konservatif menuju model yang mempertimbangkan mekanisme disipasi internal. Kemajuan ini terutama ditunjukkan oleh upaya untuk menjelaskan fenomena *precession relaxation*, yang tidak dapat dijelaskan oleh persamaan Euler klasik.

Tabel 1. Sintesis Hasil Kajian Literatur Efek Dzhani-bekov

No.	Peneliti dan Tahun	Fokus Penelitian	Metode	Hasil Utama	Kontribusi terhadap Kajian
1	De La Torre & Español (2024)	Mekanisme disipasi internal pada Efek Dzhani-bekov	Simulasi numerik menggunakan persamaan Euler termodifikasi dengan metode Runge-Kutta orde empat	<i>Orientational diffusion</i> terbukti menjadi mekanisme disipasi dominan yang menyebabkan <i>precession relaxation</i> . Sistem secara bertahap mengarahkan vektor kecepatan sudut sejajar dengan momentum sudut dan akhirnya berotasi pada sumbu dengan momen inersia terbesar. Sementara itu, <i>viscoelasticity</i> hanya menyebabkan redaman rotasi hingga berhenti.	Menyempurnakan persamaan Euler klasik dengan memasukkan efek disipasi internal sehingga mampu menjelaskan fenomena <i>precession relaxation</i> yang tidak dapat dijelaskan oleh model konservatif.
2	Benvenisty, Shoshani, & Elata (2025)	Fenomena Dzhani-bekov-	Simulasi numerik dan analisis Fourier	Ditemukan transisi periodik antara dua lintasan simetris	Membuktikan bahwa fenomena

		like pada bandul elastis	pada sistem bandul elastis dua derajat kebebasan	yang menyerupai Efek Dzhani­bekov. Analisis spektrum menunjukkan adanya dua skala frekuensi, yaitu frekuensi osilasi utama dan frekuensi transisi yang lebih lambat.	Dzhanibekov tidak terbatas pada rotasi benda tegar, tetapi juga muncul pada sistem osilasi nonlinier dengan dinamika <i>slow-fast</i> .
3	Ostanin & Sperl (2024)	Pemanfaatan Efek Dzhani­bekov untuk re-orientasi satelit	Simulasi kontrol optimal tensor inersia yang berubah terhadap waktu	Ketidakstabilan sumbu tengah dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan re-orientasi benda berputar tanpa menggunakan propelan. Perubahan tensor inersia memungkinkan pencapaian orientasi yang diinginkan secara efisien.	Menunjukkan aplikasi praktis Efek Dzhani­bekov dalam teknologi antariksa dan sistem kendali sikap (<i>attitude control</i>) satelit.
4	Wah & Melatos (2024)	Efek Dzhani­bekov sebagai sumber aktivitas magnetar	Pemodelan magnetar sebagai benda tegar triaksial menggunakan persamaan Euler	Proses pembalikan sumbu pada magnetar menghasilkan gaya Euler yang dapat memicu <i>plastic flow</i> pada kerak bintang neutron dan menghasilkan semburan sinar-X serta gelombang gravitasi. Waktu karakteristik flip diperkirakan sekitar 18 menit.	

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penelitian tentang Efek Dzhani­bekov telah berkembang dari pendekatan konservatif ke pendekatan dissipatif. Teori klasik, yang didasarkan pada persamaan Euler, berhasil menjelaskan ketidakstabilan rotasi pada sumbu dengan momen inersia menengah (juga dikenal sebagai ketidakstabilan sumbu tengah). Namun, ia gagal menjelaskan fenomena relaksasi precession, yaitu kecenderungan benda untuk berotasi stabil pada sumbu dengan momen inersia terbesar. Menurut model konservatif, objek yang terkena dampak Dzhani­bekov akan terus mengalami pergeseran orientasi secara berkala tanpa mencapai titik akhir.

Studi De La Torre dan Español (2024) menemukan bahwa penambahan mekanisme disipasi internal seperti difusi orientasi dan viscoelasticity dapat menjelaskan fenomena tersebut. Hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa mekanisme dominan dari difusi orientasi menyebabkan bagian dari kecepatan sudut yang tegak lurus terhadap momentum sudut secara bertahap redaman sampai vektor kecepatan sudut sejajar dengan momentum sudut total. Dalam keadaan ini, sistem bergerak ke keadaan energi minimum, yang berarti bergerak pada sumbu dengan momen inersia terbesar. Sebaliknya, mekanisme viskoelastik hanya meredam

seluruh komponen kecepatan sudut menuju nol, menyebabkan objek berhenti berotasi. Hasilnya menunjukkan bahwa, dibandingkan dengan model konservatif murni, mekanisme dissipatif tertentu lebih relevan untuk menjelaskan fenomena fisik yang diamati secara eksperimen.

Hasilnya memperluas teori Euler klasik dengan menunjukkan bahwa perilaku rotasi benda tegar tidak selalu konservatif di dunia nyata. Adanya disipasi internal menjelaskan mengapa sistem fisik cenderung berkembang ke keadaan yang lebih stabil dan hemat energi. Oleh karena itu, penelitian ini berhasil menjembatani perbedaan antara fenomena eksperimental dan prediksi teoritis tentang Efek Dzhani­bekov.

Universalitas Efek Dzhani­bekov pada Sistem Dinamis Nonlinier

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa sifat Efek Dzhani­bekov ditemukan pada sistem rotasi benda tegar dan sistem dinamis nonlinier lainnya. Dibandingkan dengan pola dinamika yang dipahami sebelumnya, temuan ini menunjukkan bahwa fenomena pembalikan keadaan secara periodik merupakan pola dinamika yang lebih umum.

Tabel 2. Perbandingan Kontribusi Setiap Penelitian terhadap Pengembangan Teori Efek Dzhani­bekov

Aspek Kajian	Jurnal 1	Jurnal 2	Jurnal 3	Jurnal 4
Fenomena yang dikaji	<i>Precession relaxation</i> pada benda tegar	Transisi Dzhani­bekov-like pada bandul elastis	Re-orientasi satelit menggunakan ketidakstabilan rotasi	Aktivitas magnetar akibat flip rotasi
Pendekatan utama	Disipasi internal	Sistem osilasi nonlinier	Kontrol optimal inersia	Astrofisika benda tegar
Sistem yang dikaji	Benda tegar triaksial	Bandul elastis	Pesawat ruang angkasa	Magnetar
Temuan utama	<i>Orientational diffusion</i> menjelaskan relaksasi rotasi	Fenomena flipping bersifat universal	Ketidakstabilan dapat dimanfaatkan sebagai mekanisme kontrol	Efek Dzhani­bekov berpotensi memicu semburan magnetar
Kontribusi ilmiah	Pengembangan model Euler dissipatif	Generalisasi fenomena ke sistem osilasi	Implementasi teknik antariksa	Aplikasi pada objek astrofisika
Relevansi terhadap teori Euler	Memperluas teori Euler klasik	Menunjukkan analogi pada sistem lain	Memfaatkan ketidakstabilan untuk kontrol	Mengaplikasikan persamaan Euler pada skala kosmik
Sumber	De La Torre & Español (2024)	Benvenisty et al. (2025)	Ostanin & Sperl (2024)	Wah & Melatos (2024)

Sebagai hasil dari studi yang dilakukan oleh Benvenisty, Shoshani, dan Elata (2025), karakteristik Efek Dzhani­bekov ditemukan pada sistem rotasi benda tegar. Mereka juga ditemukan pada sistem osilasi nonlinier yang terdiri dari bandul elastis. Hasil simulasi menunjukkan bahwa antara dua lintasan yang merupakan bayangan cermin satu sama lain terjadi peralihan secara berkala. Pada benda tegar yang berotasi di sekitar sumbu inersia tengah, fenomena ini mirip dengan pembalikan orientasi.

Sistem tersebut memiliki dua skala frekuensi, menurut analisis Fourier. Frekuensi pertama adalah frekuensi utama osilasi bandul, dan yang kedua adalah frekuensi transisi yang lebih lambat. Struktur dua skala frekuensi ini menunjukkan bahwa ada dinamika sistem yang lambat dan cepat. Variabel cepat dimodulasi oleh variabel lambat, yang menyebabkan fenomena pembalikan keadaan yang terjadi secara berkala. Hasil ini menunjukkan bahwa pola ketidakstabilan yang merupakan inti dari Efek Dzhani­bekov adalah fenomena yang lebih umum dan tidak hanya terkait dengan dinamika rotasi benda tegar.

Hasil penelitian tersebut secara teoritis memperluas Theorem Tennis Racket dari sistem rotasi ke sistem osilasi nonlinier. Kedua sistem memiliki pola transisi yang sama, yang menunjukkan bahwa mekanisme ketidakstabilan dapat muncul pada sistem fisik yang berbeda, yang memiliki struktur dinamika nonlinier dan karakteristik skala waktu yang berbeda. Oleh

karena itu, efek Dzhani­bekov tidak hanya merupakan hasil dari rotasi benda tegar, tetapi merupakan manifestasi umum dari dinamika nonlinier.

Pemanfaatan Efek Dzhani­bekov dalam Teknologi Antariksa

Selain memberikan kontribusi terhadap perkembangan teori mekanika, efek Dzhani­bekov juga dapat digunakan dalam bidang teknik antariksa. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa ketidakstabilan rotasi, yang sebelumnya dianggap sebagai kelemahan sistem, dapat digunakan sebagai mekanisme untuk mengontrol orientasi wahana antariksa secara efisien.

Tabel 3. Sintesis Temuan Utama Kajian Literatur

Tema	Temuan Utama	Implikasi
Pengembangan Teori	Persamaan Euler klasik perlu dimodifikasi dengan mekanisme disipasi untuk menjelaskan <i>precession relaxation</i> .	Memberikan model yang lebih realistis untuk dinamika benda tegar nyata.
Universalitas Fenomena	Efek Dzhani­bekov ditemukan tidak hanya pada rotasi benda tegar tetapi juga pada sistem osilasi nonlinier.	Menunjukkan bahwa fenomena ini merupakan pola umum dalam sistem dinamis nonlinier.
Aplikasi Teknik	Ketidakstabilan sumbu tengah dapat dimanfaatkan untuk manuver satelit tanpa propelan.	Membuka peluang pengembangan sistem kendali antariksa yang lebih efisien.
Aplikasi Astrofisika	Efek Dzhani­bekov dapat menjadi mekanisme pemicu aktivitas magnetar.	Memperluas penerapan mekanika klasik dalam menjelaskan fenomena kosmik.

Studi terbaru menunjukkan bahwa Efek Dzhani­bekov dipelajari bukan hanya sebagai fenomena fisika dasar tetapi juga digunakan untuk teknik. Menurut penelitian Ostanin dan Sperl (2024), ketidakstabilan sumbu tengah dapat digunakan untuk mengubah orientasi satelit tanpa propelan. Sistem dapat dipaksa mengalami pembalikan orientasi pada waktu yang diinginkan, yang menghasilkan perubahan arah rotasi yang tepat, dengan menggunakan perubahan tensor inersia yang dikontrol.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode kontrol berbasis perubahan tensor inersia lebih efisien daripada metode konvensional yang menggunakan thruster untuk membuat lintasan manuver yang kompleks. Hasil ini menunjukkan bahwa paradigma mekanika terapan telah berubah. Ternyata ketidakstabilan, yang sebelumnya dianggap sebagai kondisi yang harus dihindari, dapat digunakan untuk mengontrol sistem antariksa dengan baik.

Dari sudut pandang fisika, aplikasi ini menunjukkan bahwa pemahaman mendalam tentang mekanisme rotasi benda tegar dapat menghasilkan kemajuan teknologi yang signifikan. Sekarang efek Dzhani­bekov dianggap bukan anomali mekanis, tetapi mekanisme yang dapat digunakan untuk meningkatkan sistem kendali sikap (*attitude control*) pada wahana antariksa generasi berikutnya.

Menggunakan Efek Dzhani­bekov untuk membantu manuver orientasi (*attitude control*) satelit. Efek ini dikombinasikan dengan reaction wheel dan pengontrol PID. Dimana menunjukkan penghematan energi sekitar 50% dibandingkan metode konvensional pada banyak skenario manuver satelit.

Selain itu Pemanfaatan efek Dzhani­bekov (Deriglazov, A 2024) dalam solusi analitik matriks rotasi benda tegar asimetris yang mengalami Efek Dzhani­bekov. Dengan menyelesaikan persamaan Euler–Poisson pada kondisi separatrix, berhasil diperoleh rumus eksak dalam bentuk fungsi elementer yang mampu menggambarkan pembalikan orientasi 180° secara langsung dalam kerangka pengamatan laboratorium. Dimana menunjukkan bahwa Efek Dzhani­bekov merupakan konsekuensi alami dari ketidakstabilan rotasi pada sumbu momen inersia menengah dan dapat dijelaskan secara matematis tanpa pendekatan numerik yang kompleks.

Aplikasi Efek Dzhani­bekov pada Astrofisika Magnetar

Kajian yang dilakukan oleh Wah dan Melatos (2024) menunjukkan bahwa gagasan Efek Dzhani­bekov juga berkaitan dengan benda-benda di langit, terutama magnetar. Medan magnet yang kuat mengubah magnet menjadi benda tegar triaksial. Sebagaimana dijelaskan oleh Theorem Bola Sepak Tennis, fenomena pembalikan orientasi dapat terjadi dalam situasi di mana rotasi di sekitar sumbu tengah menjadi tidak stabil. Secara fisis, kondisi ini dapat terwujud karena magnetar memiliki medan magnet internal tipe toroidal yang sangat masif, yang menurut literatur pendukung mampu mendistorsi geometri bintang neutron menjadi struktur triaksial asimetris (Lander & Jones, 2020).

Studi tersebut menemukan bahwa gaya Euler yang cukup besar muncul selama proses pembalikan sumbu sehingga mengganggu keseimbangan mekanik pada lapisan permukaan magnetar. Dalam fase pembalikan orientasi ini, Persamaan Euler nonlinier memprediksi munculnya Torsi Euler atau Gaya Euler seketika yang sangat kuat (Zanazzi & Lai, 2015) Gagasan ini dapat menyebabkan aliran plastik, yang akan menghasilkan semburan sinar-X dan gelombang gravitasi. Menurut perhitungan teoritis, durasi pembalikan magnetar sekitar 18 menit. Ini masih dalam rentang waktu yang telah dilaporkan sebelumnya untuk aktivitas magnetar.

Hasil ini menunjukkan bahwa hukum mekanika klasik, yang diciptakan melalui persamaan Euler, masih dapat diterapkan untuk menjelaskan peristiwa dalam skala astrofisika. Oleh karena itu, Efek Dzhani­bekov adalah contoh sempurna bagaimana gagasan tentang mekanika benda tegar dapat diterapkan dalam berbagai konteks, mulai dari sistem laboratorium hingga benda angkasa yang memiliki massa dan dimensi yang sangat besar.

Fondasi Teoritis Dinamika Rotasi Benda Tegar Asimetris dan Persamaan Euler

Bagian ini menguraikan dasar mekanika klasik mengenai pergerakan rotasi objek triaksial tanpa adanya pengaruh torka dari luar. Berdasarkan formulasi persamaan Euler konvensional, stabilitas rotasi hanya tercapai jika objek berputar pada sumbu dengan momen inersia translasional terbesar atau terkecil. Sebaliknya, orientasi perputaran yang sejajar dengan sumbu intermediet (tengah) secara inheren tidak stabil dan memicu perubahan arah kutub secara siklis. Teorema ini menjadi fondasi matematika awal dalam memetakan anomali gerak yang mendasari munculnya Efek Dzhani­bekov (Kleppner & Kolenkow, 2010).

Transisi Model Mekanika: Dari Konservatif ke Formulasi *Dissipatif Intern*

Keterbatasan utama dari persamaan Euler klasik adalah ketidakmampuannya dalam menguraikan fenomena *precession relaxation*, di mana dalam kondisi riil objek cenderung melambat dan mencari titik ekuilibrium baru yang stabil. Pemodelan kontemporer berhasil mengatasi kelemahan model konservatif ini dengan mengintegrasikan faktor disipasi energi internal. Mekanisme difusi orientasi terbukti secara dominan memandu vektor kecepatan sudut agar selaras dengan momentum sudut total, sehingga mengarahkan objek menuju level energi minimum pada rotasi sumbu utama (De La Torre & Espanol, 2024).

Universalitas Efek Dzhani­bekov dalam Sistem Osilasi Nonlinier Multi-Skala

Evolusi teoritis terbaru membuktikan bahwa karakteristik pembalikan keadaan secara periodik (efek menyerupai Dzhani­bekov) tidak hanya eksklusif terjadi pada kinematika tegar berotasi. Dalam sistem osilasi nonlinier seperti bandul elastis dengan dua derajat kebebasan, ditemukan pola transisi serupa yang dipicu oleh dinamika *slow-fast*. Analisis spektral mengonfirmasi bahwa interaksi antara frekuensi osilasi cepat dan modulasi frekuensi transisi lambat menghasilkan perilaku *flipping* yang serupa, menegaskan sifat universalitas fenomena ini pada sistem dinamis makroskopis (Benvenisty dkk., 2025).

Aplikasi Pengendalian Sikap Wahana Antariksa Berbasis Tensor Inersia

Di bidang teknik kedirgantaraan, sifat instabilitas rotasi pada sumbu intermediet yang awalnya dianggap merugikan kini dialihkan menjadi metode kendali performa tinggi. Dengan memanipulasi komponen tensor inersia pesawat luar angkasa atau satelit secara dinamis terhadap waktu, manuver reorientasi posisi dapat dieksekusi secara presisi. Implementasi kontrol optimal berbasis Efek Dzhanibekov ini menawarkan efisiensi tinggi karena mampu menghemat konsumsi bahan bakar jet (*propellant-free maneuver*) secara signifikan dibandingkan penggunaan thruster konvensional (Ostanin & Sperl, 2024).

Sintesis Hasil Kajian

Sebagai kesimpulan dari sintesis keempat artikel yang dikaji, dapat disimpulkan bahwa Efek Dzhanibekov adalah fenomena universal yang menghubungkan teori mekanika klasik dengan berbagai kemajuan dalam bidang ilmu pengetahuan modern. De La Torre dan Español (2024) menjelaskan mekanisme disipasi yang menyebabkan relaksasi precession; Benvenisty et al. (2025) menunjukkan bahwa fenomena serupa terjadi pada sistem osilasi nonlinier; Ostanin dan Sperl (2024) menunjukkan kemungkinan aplikasinya dalam pengendalian satelit; dan Wah dan Melatos (2024) memperluas aplikasinya ke bidang astrofisika.

Secara keseluruhan, temuan penelitian menunjukkan bahwa penelitian Efek Dzhanibekov telah berkembang dari tahap pemahaman fenomena dasar ke tahap pembuatan model dissipatif, penyelidikan analogi lintas sistem fisika, dan penerapan dalam bidang teknologi dan astrofisika. Ini menunjukkan bahwa dinamika rotasi benda tegar masih relevan dan terus berkembang dari perspektif teoritis dan aplikatif.

5. Kesimpulan

Kajian literatur yang telah dilakukan menunjukkan bahwa Efek Dzhanibekov adalah fenomena ketidakstabilan rotasi pada benda tegar triaksial yang berotasi di sekitar sumbu dengan momen inersia menengah. Ini adalah salah satu studi penting tentang dinamika benda tegar kontemporer. Persamaan Euler klasik dapat menjelaskan munculnya ketidakstabilan sumbu tengah dan fenomena pembalikan orientasi secara bertahap, tetapi mereka tidak dapat menjelaskan proses relaksasi precession yang terjadi pada sistem yang sebenarnya. Studi baru menunjukkan bahwa mekanisme disipasi internal, khususnya difusi orientasi, sangat penting untuk mengarahkan sistem menuju keadaan stabil dengan energi minimum dengan rotasi pada sumbu dengan momen inersia terbesar.

Selain itu, penelitian ini menunjukkan bahwa Efek Dzhanibekov bukan hanya terbatas pada rotasi benda tegar. Fenomena serupa ditemukan pada sistem bandul elastis, yang melakukan transisi periodik antara dua keadaan simetris melalui mekanisme dinamika yang lambat. Hasilnya menunjukkan bahwa pola ketidakstabilan yang mendasari Efek Dzhanibekov umum dan dapat muncul dalam berbagai sistem dinamis nonlinier.

Efek Dzhanibekov tidak hanya memiliki nilai teoritis yang tinggi, tetapi juga memiliki banyak aplikasi praktis. Melalui pengendalian tensor inersia yang optimal, ketidakstabilan sumbu tengah dapat digunakan dalam teknologi antariksa untuk memungkinkan reorientasi satelit tanpa menggunakan propelan. Dalam bidang astrofisika, munculnya gaya Euler selama proses pembalikan sumbu yang dapat menghasilkan semburan sinar-X dan gelombang gravitasi berpotensi menjadi mekanisme yang menjelaskan aktivitas magnetar.

Secara keseluruhan, temuan penelitian menunjukkan bahwa melalui kemajuan penelitian Efek Dzhanibekov, pemahaman kita tentang dinamika rotasi benda tegar telah berkembang dari teori mekanika klasik ke bidang yang berbeda. Hasilnya menunjukkan bahwa ide-ide yang berasal dari analisis stabilitas rotasi telah menjadi landasan penting dalam penelitian fisika nonlinier, teknologi antariksa, dan astrofisika kontemporer. Selain itu, temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa masih ada banyak peluang untuk pengembangan penelitian tambahan.

Daftar Pustaka

- Akbar, M. R., & Munthomimah, S. (2024). Persepsi dan pemahaman strategi coping guru PAUD: Analisis pembangunan karakter tangguh anak usia dini. *Jurnal Pendidikan Karakter*, 38–43.
- Akiba, D. (2022). Computational thinking and coding for young children: A hybrid approach to link unplugged and plugged activities. *Education Sciences*, 12(11), 793.
- Arya, A. P. (1997). *Introduction to Classical Mechanics*. Prentice Hall Internat.
- Benvenisty, E., Shoshani, O., & Elata, D. (2025). The elastic pendulum: Dzhani-bekov-like transitions of symmetric and asymmetric periodic responses. *Nonlinear Dynamics*, 113(16), 20841–20853. <https://doi.org/10.1007/s11071-025-11242-9>
- Castro, I., Fernandez., Tejada, JM., Reales, G., Checa, A. (2025) An Energy and Time Efficient Attitude Determination and Control System for Inertia-Morphing Spacecraft using the Dzhani-bekov Effect. *Multibody System Dynamics*, Vol. 66, pp. 575–598
- De La Torre, J. A., & Español, P. (2024). Internal dissipation in the Dzhani-bekov effect. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 106, 105298.
- Deriglazov, A. (2024) An Asymmetrical Body: Example of Analytical Solution for the Rotation Matrix in Elementary Functions and Dzhani-bekov Effect. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. Vol 138. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2024.108257>
- Fatimah, S., Sukrin, S., & Kusumawati, Y. (2025). Strategi guru PAUD dalam penerapan pembelajaran berdiferensiasi untuk memenuhi keberagaman gaya belajar anak usia dini. *Jurnal Pendidikan dan Pembelajaran Indonesia (JPPI)*, 5(2), 644–659.
- Fitriyah, Q. F., Saputri, L. R., & Aljawad, H. I. (2023). Praktik unplugged coding berbasis daily lives dalam meningkatkan computational thinking pada anak usia dini. *Jurnal Pendidikan Anak (Website Ini Sudah Bermigrasi Ke Website Yang Baru==> [https://Journal. Uny. Ac. Id/v3/Jpa](https://Journal.Uny.Ac.Id/v3/Jpa))*, 176–185.
- Kleppner, D., & Kolenkow, R. J. (2010). *An Introduction to Mechanics*. Cambridge University Press.
- Lander, S. K., & Jones, D. I. (2020). Magnetic fields in neutron stars: linking internal structure to free precession. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 494(4), 4813–4829.
- Ostanin, I. A., & Sperl, M. (2024). Arbitrary controlled re-orientation of a spinning body by evolving its tensor of inertia. *Computer Physics Communications*, 300, 109181.
- Wada, T., & Shimoda, J. (2024). The Dzhani-bekov Effect as a Possible Source of Magnetar Activity. *The Astrophysical Journal*, 972(1), 58.
- Widiastutik, E., Renandra, I., & Yayuk, E. (2025). CODING UNPLUGGED SEBAGAI INOVASI PEMBELAJARAN UNTUK MEMBANGUN LITERASI DIGITAL ANAK USIA DINI DI PAUD. *Pendas : Jurnal Ilmiah Pendidikan Dasar*, 10(04), 252–262. <https://doi.org/10.23969/jp.v10i04.34933>
- Zanazzi, J. J., & Dong, L. (2015). Free precession of triaxial neutron stars: dynamics and gravitational wave emission. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 451(2), 1383–1395.