

Tinjauan Literatur Pengurungan Plasma Secara Magnetik Dalam Sistem Tokamak

Anawati Anawati*, Aditya Manggala, Aubin Setiawan, Ameer Affan, Adhiyoga Sulistiono, Giyatz Zahran, Muhamad Ikhsan, Muhammad Nathin, Nailah Masyhur, Nova Maharani, Octarizky Taufik, Raden Putranti, Shaddam Alfayyadh, Yona Cahyaningtyas

Departemen Fisika, FMIPA, Universitas Indonesia, Depok 16424, Indonesia

*anawati@sci.ui.ac.id

ARTICLE INFO

Article history:

Received 01 May 2026

Revised 10 June 2026

Accepted 15 July 2026

Available online 27 July 2026

Keywords:

Please provide 3-5 words and every keyword separated by semicolon (;)



This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.
Copyright © 2025 by Author. Published by Physical Society Indonesia

ABSTRACT

The growing global demand for clean and sustainable energy sources has driven the development of alternative technologies capable of reducing dependence on fossil fuels. One of the most promising candidates is nuclear fusion energy, particularly through tokamak systems that utilize magnetic confinement to sustain high-temperature plasma. This paper presents a comprehensive review of the fundamental physics underlying plasma confinement in axisymmetric toroidal configurations, including single-particle dynamics, guiding-center and gyrokinetic theory, as well as the role of trapped and passing particles in determining neoclassical transport. In addition, transport processes and turbulence, recognized as the primary limitations on tokamak performance, are discussed, with emphasis on drift-wave turbulence and the regulating role of zonal flows. From a macroscopic perspective, magnetohydrodynamic equilibrium and stability are examined through key parameters such as the safety factor and the energy principle. Wave-particle interactions, including Landau damping and cyclotron resonance, are also addressed as essential mechanisms for plasma heating and non-inductive current drive. By

integrating phenomena across multiple scales, from microscopic to macroscopic, this study highlights that a comprehensive understanding of plasma physics is crucial for optimizing tokamak performance and advancing fusion energy as a viable future energy solution.

ABSTRAK

Kebutuhan global akan sumber energi bersih dan berkelanjutan mendorong pengembangan teknologi alternatif yang mampu menggantikan ketergantungan pada bahan bakar fosil. Salah satu kandidat paling menjanjikan adalah energi fusi nuklir, khususnya melalui sistem tokamak yang memanfaatkan pengurungan magnetik untuk mempertahankan plasma bersuhu tinggi. Makalah ini meninjau secara komprehensif dasar fisika pengurungan plasma dalam konfigurasi toroidal aksisimetris, mencakup dinamika partikel tunggal, teori guiding-center dan gyrokinetik, serta peran partikel terperangkap dan melintas dalam menentukan transport neoklasik. Selain itu, dibahas pula proses transport dan turbulensi yang menjadi keterbatasan utama kinerja tokamak, termasuk kontribusi *drift-wave* dan aliran zonal terhadap kehilangan energi. Dari perspektif makroskopik, kesetimbangan dan stabilitas magnetohidrodinamika dianalisis melalui parameter seperti faktor keamanan dan prinsip energi. Interaksi gelombang-partikel, termasuk peredaman Landau dan resonansi siklotron, juga dikaji sebagai mekanisme penting dalam pemanasan plasma dan pembangkitan arus non-induktif. Melalui integrasi berbagai skala fenomena, dari mikroskopik hingga makroskopik, kajian ini menegaskan bahwa pemahaman menyeluruh terhadap fisika plasma merupakan kunci dalam mengoptimalkan performa tokamak dan mewujudkan energi fusi sebagai solusi energi masa depan.

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan dunia akan sumber energi alternatif semakin mendesak seiring dengan meningkatnya konsumsi energi global dan keterbatasan sumber daya fosil. Ketergantungan yang tinggi pada bahan bakar fosil tidak hanya menimbulkan persoalan ketersediaan jangka panjang, tetapi juga berdampak signifikan terhadap lingkungan

melalui emisi gas rumah kaca dan perubahan iklim. Transisi menuju sumber energi yang bersih, berkelanjutan, dan berkapasitas besar menjadi salah satu tantangan utama abad ke-21. Berbagai teknologi energi terbarukan seperti tenaga surya, angin, dan hidro telah berkembang pesat, namun masing-masing masih menghadapi keterbatasan terkait intermitensi dan kepadatan energi.

Di tengah tantangan tersebut, energi fusi nuklir muncul sebagai salah satu kandidat paling menjanjikan untuk memenuhi kebutuhan energi masa depan (Belmont et al., 2019a). Berbeda dengan fisi nuklir, fusi menggabungkan inti-inti ringan seperti isotop hidrogen untuk menghasilkan energi yang sangat besar, dengan limbah radioaktif yang relatif lebih sedikit dan risiko kecelakaan yang lebih rendah (Viswanathan, 2017). Tokamak, sebagai salah satu konfigurasi utama dalam penelitian fusi magnetik, dirancang untuk mengurung plasma bersuhu sangat tinggi menggunakan medan magnet sehingga reaksi fusi dapat berlangsung secara terkendali. Potensi energi yang dihasilkan sangat besar karena bahan bakarnya, seperti deuterium, tersedia melimpah di alam, terutama di air laut (Catling et al., 2025).

Keunggulan lain dari sistem tokamak terletak pada kemampuannya menghasilkan energi secara kontinu, berbeda dengan sebagian besar sumber energi terbarukan yang bergantung pada kondisi alam. Jika tantangan teknisnya dapat diatasi, tokamak berpotensi menyediakan suplai energi yang stabil, aman, dan bebas emisi karbon dalam skala besar. Hal ini menjadikannya sebagai pelengkap strategis dalam mendukung dekarbonisasi sektor industri dan kelistrikan. Oleh karena itu, berbagai negara dan konsorsium internasional terus berinvestasi dalam penelitian dan pengembangan tokamak sebagai bagian dari upaya jangka panjang menuju kemandirian energi yang berkelanjutan (Åberg, 2021). Meskipun demikian, realisasi energi fusi melalui tokamak masih menghadapi berbagai tantangan ilmiah dan teknis, seperti pengurungan plasma yang efisien, pengendalian turbulensi, serta stabilitas magnetohidrodinamika (Derakhshan & Hosseinpour, 2026; Hong et al., 2026; Jmal et al., 2026; Kumar et al., 2026). Oleh karena itu, penelitian yang mendalam dan terintegrasi sangat diperlukan untuk menjembatani kesenjangan antara konsep teoretis dan implementasi praktis. Dengan kemajuan dalam pemodelan numerik, material tahan radiasi, dan teknologi magnet superkonduktor, prospek tokamak sebagai sumber energi masa depan semakin terbuka. Dalam konteks inilah, pengembangan ilmu dasar dan rekayasa fusi menjadi investasi strategis bagi keberlanjutan energi global. Kajian literatur ini berperan dalam mendukung pengembangan teknologi fusi yang lebih efisien dan berkelanjutan. Integrasi hasil-hasil penelitian sebelumnya memungkinkan penyusunan model prediktif yang lebih akurat untuk desain dan operasi tokamak, termasuk dalam mengoptimalkan konfigurasi medan magnet, meningkatkan waktu pengurungan energi, dan meminimalkan risiko ketidakstabilan seperti disrupsi.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi dalam penelitian ini menggunakan pendekatan penelusuran literatur yang bertujuan untuk mengumpulkan, menganalisis, dan mensintesis berbagai sumber ilmiah terkait pembangkitan dan pengurungan plasma secara magnetik dalam sistem tokamak. Sumber data diperoleh melalui penelusuran literatur dari buku teks, artikel jurnal ilmiah bereputasi, prosiding konferensi, serta informasi pendukung dari situs web yang relevan dan kredibel. Proses penelusuran dilakukan secara sistematis dengan menggunakan kata kunci yang berkaitan dengan plasma, medan magnet, dan teknologi tokamak, sehingga diperoleh referensi yang sesuai dengan fokus kajian. Selanjutnya, data dan informasi yang telah dikumpulkan dianalisis secara deskriptif-kualitatif dengan mengidentifikasi konsep utama, perkembangan teknologi, serta tantangan dalam pengurungan plasma magnetik. Penyusunan naskah dilakukan dengan mengintegrasikan berbagai temuan dari literatur tersebut secara terstruktur dan logis. Dalam proses pengolahan data serta perumusan kalimat, peneliti juga memanfaatkan bantuan model bahasa berbasis kecerdasan buatan, yaitu ChatGPT, untuk meningkatkan kejelasan, koherensi, dan efektivitas penyampaian informasi, tanpa mengurangi validitas ilmiah dari sumber yang digunakan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pengurungan plasma secara magnetik dalam sistem toroida aksisimetris

Plasma tersusun atas partikel bermuatan yaitu campuran gas terionisasi dan elektron bebas sehingga dapat diarahkan bergerak mengikuti lintasan medan magnet (Belmont et al., 2019a). Hal ini yang menjadi dasar proses pengurungan plasma dengan medan magnet. Pengurungan magnetik telah dilakukan pada sistem Stellator, yaitu perangkat pembangkit listrik fusi pertama (Spitzer, 1958). Proses pengurungan magnetik pada Stellator tergolong sangat rumit walaupun menghasilkan efisiensi pengurungan yang cukup tinggi. Oleh karena itu, Tokamak, yang memiliki geometri yang lebih sederhana, lebih menarik untuk diteliti.

Dalam Tokamak, pengurungan plasma dihasilkan melalui superposisi medan magnet toroida (mengikuti lingkaran luar) dan poloida (mengitari lubang) yang menghasilkan lintasan heliks/spiral sehingga mencegah terjadinya layangan partikel akibat gradien medan magnet (Velasco et al., 2020). Pembentukan plasma dalam struktur toroida melibatkan mekanisme induktif maupun non-induktif. Secara konvensional, pemanasan Ohmic

melalui induksi arus plasma biasanya digunakan untuk memicu ionisasi gas (Gao, 2016). Namun pada perangkat modern seperti Stellator dan Tokamak, pembentukan plasma dilakukan dengan pemanasan resonansi siklotron elektron dan partikel netral (Li et al., 2025). Optimasi geometri pada Tokamak meningkatkan efisiensi tekanan plasma yang mampu membantu nilai ekonomis reaktor.

Ketika partikel plasma bergerak di dalam medan magnet, partikel mengalami gaya Lorentz dengan arah tegak lurus kecepatan partikel, sehingga menghasilkan gerak spiral di sekitar garis medan magnet. Efektivitas pengurungan plasma sangat bergantung pada topologi medan magnet yang diterapkan, khususnya perbedaan antara konfigurasi medan magnet terbuka dan tertutup. Pada konfigurasi medan magnet terbuka, garis medan magnet berakhir pada dinding atau keluar sistem, sehingga partikel plasma yang mengikuti garis medan tersebut akan meninggalkan pengurungan (Gao, 2016). Kondisi ini menyebabkan hilangnya energi plasma secara signifikan dan membuat plasma tidak dapat dipertahankan. Sebaliknya, pada Tokamak, medan magnet dirancang membentuk lintasan tertutup yang menghasilkan fluks permukaan medan magnet tertutup. Medan ini berfungsi sebagai batas efektif pergerakan radial plasma sehingga plasma terkurung secara stabil tanpa bersentuhan dengan dinding reaktor.

Teori *guiding-center* biasanya digunakan untuk menganalisis pergerakan partikel. Dalam teori ini, gerakan partikel bermuatan dipisahkan menjadi komponen rotasi dan translasi. Persamaan (1) menunjukkan persamaan momen magnetik μ yang menggambarkan besar dan arah gerak melingkar partikel bermuatan saat berada dalam medan magnet (Belmont et al., 2019b). Persamaan ini mengimplikasikan bahwa partikel akan tetap terikat pada garis medan magnet selama gradien medan magnet berubah secara perlahan.

$$\mu = \frac{mv_{\perp}^2}{2B} \quad (1)$$

Untuk menyederhakan sistem yang kompleks, dilakukan perhitungan rata-rata gerak orbital yang hasilnya adalah sebuah titik pusat yang disebut pusat gerak (*gyrocenter*) yang merepresentasikan posisi rata-rata partikel pada satu periode rotasi. Oleh karena itu digunakanlah teori *gyrokinetic*. Teori *gyrokinetic* melihat kumpulan partikel menjadi fungsi distribusi *gyrocenter* dengan waktu gerak yang lebih lambat dibandingkan gerak spiral tiap partikel. Namun, karena medan toroida tidak homogen dan berkurang terhadap jari-jari ($B \propto 1/R$), partikel mengalami variasi medan sepanjang lintasannya. Dalam pendekatan *guiding-center*, gerak partikel yang dipercepat atau dikenal sebagai siklotron, dipisahkan dari gerak pusat orbit, sehingga gerak efektif ditentukan oleh konservasi momen magnetik seperti pada persamaan (1) yang tetap konstan. Konservasi ini menyebabkan peningkatan komponen kecepatan tegak lurus dan penurunan komponen sejajar saat partikel memasuki daerah medan yang lebih kuat. Ketika memenuhi kondisi persamaan (2) maka terjadi efek kaca magnetik (*magnetic mirror*) yang menghasilkan partikel terperangkap pada komponen tegak lurus dan partikel melintas untuk komponen sejajar (Brizard & Duthoit, 2014).

$$v_{\parallel}^2 = v^2 - v_{\perp}^2 \rightarrow 0 \quad (2)$$

Partikel terperangkap akan membentuk lintasan khas orbit pisang (*banana orbit*) pada penampang poloida akibat kombinasi efek pantulan magnetik. Sebaliknya, partikel melintas mengikuti lintasan heliks yang lebih terikat pada permukaan fluks. Distribusi kedua jenis orbit ini dipengaruhi oleh struktur medan magnet keseluruhan. Struktur medan magnet tidak sepenuhnya homogen, namun memiliki struktur kompleks seperti daerah perturbasi, resonansi, dan acak (Ludvig-Osipov et al., 2025).

3.2. Proses transport dan turbulensi dalam plasma

Karakteristik transport partikel dalam plasma ditentukan oleh frekuensi tumbukan. Berdasarkan parameter ini, plasma dalam tokamak terbagi menjadi tiga daerah utama: orbit pisang (*banana regime*) pada tumbukan rendah, plateau pada tumbukan menengah, dan Pfirsch-Schlüter pada tumbukan tinggi (Helander, 2012). Pada daerah Pfirsch-Schlüter, terjadi tumbukan antar partikel dominan sehingga frekuensi tumbukan melebihi frekuensi gerak sepanjang garis medan magnet (Catto & Simakov, 2009). Daerah Plateau terjadi pada kondisi tumbukan menengah, dimana frekuensi tumbukan sebanding dengan frekuensi gerak partikel. Adapun daerah orbit pisang muncul pada tumbukan rendah, ketika frekuensi tumbukan jauh lebih kecil dibanding frekuensi gerak partikel, sehingga lintasan partikel membentuk orbit khas menyerupai pisang. Daerah orbit pisang sangat penting bagi keseimbangan dan stabilitas operasi tokamak. Dengan demikian, kontribusi fluks partikel dari ketiga daerah tersebut menentukan waktu penahanan plasma dalam sistem kurungan magnetik (Pusztai & Catto, 2010). Semakin efektif penahanan ini, semakin lama plasma dapat dipertahankan sebelum mengalami kehilangan partikel dan energi.

Namun, dalam arah radial, transport partikel secara teoritis diperkirakan sangat lambat. Berbeda dengan prediksi ini, hasil eksperimen menunjukkan kebocoran panas yang jauh lebih besar (Li et al., 2025). Ketidaksesuaian ini mengindikasikan adanya mekanisme tambahan di luar model dasar. Fenomena tersebut

dikenal sebagai transport anomali, yang disebabkan oleh turbulensi skala mikro akibat gradien tekanan dan suhu yang tajam. Turbulensi ini memicu fluktuasi medan listrik yang menghasilkan pelayangan $E \times B$ ke arah radial. Oleh karena itu, untuk menjelaskan transport plasma secara komprehensif, digunakan tiga kerangka teori utama yaitu transport klasik, neoklasik, dan anomali.

Teori klasik memodelkan plasma dalam geometri silinder sederhana dan medan magnet lurus serta seragam. Dalam kerangka ini, perpindahan partikel ditentukan oleh tumbukan biner antara elektron dan ion. Partikel bergerak melingkar mengikuti garis medan magnet, dan setiap tumbukan menggeser pusat pemandu sejauh radius Larmor (ρ). Karena frekuensi tumbukan pada plasma bersuhu tinggi sangat rendah, perpindahan radial berlangsung sangat lambat. Akibatnya, model ini memprediksi waktu pengurangan energi yang sangat besar, sekitar 670 s untuk skala reaktor (Helander, 2012). Namun, pendekatan ini terbatas karena mengabaikan kelengkungan medan magnet serta efek kolektif dan fluktuasi plasma dalam sistem toroida (Doyle et al., 2007).

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, dikembangkan teori neoklasik yang mempertimbangkan geometri toroida. Dalam pendekatan ini, mekanisme dasar dipicu oleh tumbukan, tetapi diperkuat oleh ketidakseragaman medan magnet dan dinamika orbit partikel. Pada geometri torus, sebagian partikel terperangkap dalam orbit pisang akibat variasi kuat medan magnet. Lebar orbit ini jauh lebih besar dibanding radius Larmor, sehingga setiap tumbukan menghasilkan perpindahan radial yang lebih signifikan. Akibatnya, difusi meningkat dan waktu pengurangan energi menurun drastis hingga 11 s. Selain itu, teori neoklasik menjelaskan munculnya arus bootstrap, yaitu arus alami yang timbul akibat gradien tekanan tanpa sumber arus eksternal.

Lebih lanjut, dalam geometri toroida, gradien dan kelengkungan medan magnet menyebabkan pelayangan yang menggeser pusat pemandu partikel secara radial. Pergeseran ini bersifat kumulatif dan tidak beresilasi balik, sehingga menghasilkan perpindahan total yang terus meningkat. Pada tokamak aksisimetris, kontribusi pergeseran radial partikel terperangkap saling meniadakan, sedangkan pada konfigurasi non-aksisimetris efek tersebut menjadi signifikan. Dengan demikian, meskipun teori neoklasik memberikan deskripsi yang lebih realistis dibanding teori klasik, pendekatan ini masih memiliki keterbatasan. Kritik utama menyatakan bahwa model fluida berbasis kuasi-netral belum sepenuhnya konsisten dengan Hukum Gauss dalam menggambarkan kesetimbangan medan elektrostatis (Johnson, 2011). Oleh karena itu, analisis transport neoklasik yang akurat memerlukan pendekatan kinetik yang lebih komprehensif.

Deskripsi formal transport neoklasik dalam plasma terkurung magnetik dirumuskan melalui *drift-kinetic equation (DKE)*, yang diturunkan dari persamaan Boltzmann dengan menggunakan pendekatan *guiding-center* dan asumsi pemisahan skala waktu, yaitu bahwa gerak partikel sepanjang garis medan magnet berlangsung jauh lebih cepat dibandingkan proses tumbukan (Hinton & Hazeltine, 1976). Dalam kerangka ini, dinamika partikel direduksi dari gerak penuh menjadi gerak pusat pemandu (*guiding center*), sehingga efek layangan akibat ketidakseragaman medan magnet dan medan listrik dapat dianalisis secara sistematis. Dalam koordinat fluks magnet (ψ, α, l) serta variabel kecepatan (v, λ), deviasi distribusi partikel dari keadaan kesetimbangan Maxwellian g_b memenuhi bentuk umum persamaan kinetik yang ditunjukkan pada persamaan (3), sebagaimana diformulasikan dalam literatur modern seperti karya (Velasco et al., 2020). Operator tumbukan linier didefinisikan pada persamaan (4), distribusi kesetimbangan Maxwellian pada persamaan (5), dan potensial elektrostatis pada persamaan (6).

$$\int_{l_{b1}}^{l_{b2}} \frac{dl}{|v_{\parallel}|} (v_{D,b} \cdot \nabla \alpha \partial_{\alpha} g_b + v_{D,b} \cdot \nabla \psi Y_b F_{M,b}) = \int_{l_{b1}}^{l_{b2}} \frac{dl}{|v_{\parallel}|} C_b^{lin}[g_b] \quad (3)$$

$$C_b^{lin}[g_b] = v_{\lambda,b} \frac{v_{\parallel}}{v^2 B} \partial_{\lambda} (v_{\parallel} \lambda \partial_{\lambda} g_b) \quad (4)$$

$$F_{M,b} = n_b \left(\frac{m_b}{2\pi T_b} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{m_b v^2}{2T_b}\right) \quad (5)$$

$$\phi(\psi, \alpha, l) = \phi_0(\psi) + \phi_1(\psi, \alpha, l) \quad (6)$$

Pada formulasi ini, $\phi_0(\psi)$ menentukan medan listrik radial ambipolar yang mengatur kesetimbangan fluks partikel, sedangkan $\phi_1(\psi, \alpha, l)$ merepresentasikan variasi potensial pada permukaan fluks yang berkontribusi terhadap dinamika partikel terperangkap. Dengan demikian, kerangka kinetik pelayangan menggambarkan transport neoklasik secara kuantitatif, khususnya pada daerah tingkat tumbukan rendah dan sistem dengan rasio aspek besar, serta menjadi dasar dalam perhitungan koefisien difusi dan konduktivitas plasma.

Meskipun teori neoklasik memberikan prediksi yang konsisten secara fundamental, hasil eksperimen pada perangkat fusi seperti tokamak menunjukkan bahwa laju kehilangan energi plasma jauh lebih besar dibandingkan nilai yang diperkirakan oleh teori tersebut (Garbet, 2006). Ketidaksesuaian ini mengindikasikan adanya mekanisme tambahan yang tidak tercakup dalam deskripsi berbasis tumbukan semata, yaitu transport anomali yang didominasi oleh turbulensi skala mikro. Turbulensi ini umumnya dipicu oleh gradien suhu dan densitas yang

tajam, seperti *ion temperature gradient* (ITG) dan *trapped electron mode* (TEM), yang menyebabkan fluktuasi medan dan densitas sehingga meningkatkan perpindahan panas dan partikel secara radial jauh melampaui prediksi difusi neoklasik. Sebagai konsekuensi dari dominasi turbulensi tersebut, performa pengurungan energi plasma dalam eksperimen secara empiris diklasifikasikan ke dalam dua tipe yaitu *low confinement mode* (*L-mode*) dan *high confinement mode* (*H-mode*). Pada kondisi *L-mode*, tidak terbentuk penghalang transport di tepi plasma, sehingga turbulensi berkembang bebas dan menyebabkan waktu pengurungan energi relative rendah. Sebaliknya, pada *H-mode*, terbentuk penghalang transport di tepi plasma yang secara signifikan menekan turbulensi di wilayah tepi plasma (Doyle et al., 2007). Akibatnya, gradien tekanan dapat meningkat dan waktu pengurungan energi bertambah secara substansial, sering kali meningkat dua kali lipat atau lebih dibanding *L-mode*, bergantung pada parameter operasi plasma. Transisi dari *L-mode* ke *H-mode* ini menjadi salah satu kunci dalam pengembangan reaktor fusi karena berkaitan langsung dengan efisiensi pengurungan energi.

Tabel 1. Perbandingan daerah transport tokamak

Acuan	Geometri	Mekanisme	Waktu Pengurungan (τ_E)
Teori klasik	Silinder	Tumbukan biner	670 s
Teori neoklasik	Toroida	Orbit pisang	11 s
<i>H-Mode</i> (Eksperimen)	Toroida	Turbulensi teredam	0,9 s
<i>L-Mode</i> (Eksperimen)	Toroida	Instabilitas skala mikro	0,4 s

Jika ditinjau secara termodinamika, plasma dapat dianggap sebagai gas ideal yang terionisasi dengan tekanan kinetik yang sangat tinggi, yang secara sederhana dinyatakan sebagai $p=nk_B T$ (Viswanathan, 2017). Pada kondisi temperature fusi, tekanan ini menjadi sangat besar sehingga tanpa adanya mekanisme penyeimbang eksternal seperti pengurungan magnetik, plasma akan berekspansi termal yang cepat dan hampir isotropis. Akibatnya, partikel bermuatan akan bergerak menuju batas system dan berinteraksi langsung dengan dinding reaktor. Dalam perangkat seperti tokamak, interaksi plasma-dinding ini menimbulkan dua masalah utama: pertama, beban panas ekstrem yang dapat merusak material dinding, kedua proses erosi atau sputtering yang melepaskan atom dari dinding ke dalam plasma. Atom-atom ini kemudian bertindak sebagai impuritas yang meningkatkan kehilangan energi melalui radiasi (misalnya radiasi garis atau bremsstrahlung), sehingga menurunkan temperature plasma secara signifikan. Jika tidak dikendalikan, peningkatan kandungan impuritas ini dapat menggagalkan pencapaian kondisi pembakaran mandiri sebagaimana dipersyaratkan oleh Kriteria Lawson (Post et al., 1995), yang mensyaratkan kombinasi minimum antara densitas, temperatur, dan waktu pengurungan energi.

Ketidakseimbangan ini semakin diperkuat oleh fakta bahwa plasma dalam tokamak tidak pernah berada dalam kesetimbangan termodinamika global. Hal ini disebabkan oleh adanya gradien densitas (∇n) dan gradien temperatur (∇T) yang sangat tajam antara inti plasma yang panas dan wilayah tepi yang jauh lebih dingin. Gradien-gradien ini merupakan sumber energi bebas yang memicu berbagai ketidakstabilan mikro maupun makro, sebagaimana dibahas dalam literatur klasik (Scott, 2002). Ketidakstabilan tersebut kemudian berkembang menjadi turbulensi yang mempercepat transport partikel dan energi. Di sisi lain, dalam plasma bermedan magnet kuat, kombinasi gaya listrik dan ketidakseragaman medan magnet menghasilkan berbagai kecepatan layangan yang menyebabkan partikel secara efektif melintasi garis medan magnet, sebagaimana dijelaskan oleh (Rehman, 2019). Interaksi antara gradien termodinamika, turbulensi, dan mekanisme drift inilah yang pada akhirnya menentukan tingkat kehilangan energi dan partikel dalam plasma terkurung magnetik.

Terbentuknya gelombang layangan (*drift waves*) berawal dari gangguan kecil pada distribusi densitas dan potensial plasma. Ketika fluktuasi ini muncul, elektron dengan massa yang jauh lebih kecil dibanding ion, akan merespons dengan sangat cepat sepanjang garis medan magnet untuk menetralkan fluktuasi muatan (Rehman, 2019). Dalam kondisi ideal, respons ini menjaga kuasi-netralitas plasma. Namun, dalam prakteknya, respons elektron seringkali tidak sempurna akibat efek inersia, tumbukan (resistivitas), maupun keterbatasan gerak pada medan magnet tak homogen. Akibatnya, muncul pergeseran fase antara fluktuasi densitas dan fluktuasi potensial listrik, sebagaimana dijelaskan dalam kajian turbulensi plasma oleh (Scott, 2002). Pergeseran fase ini menjadi mekanisme kunci yang memungkinkan munculnya aliran $E \times B$, yang secara efektif mentransport partikel dan energi secara radial keluar dari inti plasma menuju tepi, seperti dilaporkan dalam studi modern (Wei et al., 2023).

Berdasarkan mekanisme penggerakannya, ketidakstabilan gelombang layangan umumnya diklasifikasikan menjadi dua jenis utama. Pertama, *ion temperature gradient* (ITG), yaitu ketidakstabilan yang dipicu oleh gradien

suhu ion yang tajam. Mode ini berkontribusi dominan terhadap transport panas ion dan menjadi sumber utama turbulensi di inti plasma. Kedua, *trapped electron mode* (TEM), yang muncul akibat adanya elektron yang terperangkap dalam sumur magnetik pada medan magnet toroida yang tidak homogen, seperti pada konfigurasi tokamak. Elektron terperangkap ini tidak dapat bergerak bebas sepanjang garis medan untuk menetralkan fluktuasi muatan, sehingga justru memperkuat ketidakstabilan dan meningkatkan tingkat turbulensi (Yang et al., 2018).

Seiring waktu, amplitudo gelombang layangan mengalami pertumbuhan yang pada tahap awal dapat dideskripsikan secara linier dan bersifat eksponensial. Namun, ketika amplitudonya semakin besar, interaksi nonlinier antar mode menjadi signifikan, sehingga sistem bertransisi menuju keadaan turbulensi jenuh (*saturated turbulence*) (Scott, 2002). Dalam daerah ini, struktur aliran plasma ditandai oleh terbentuknya pusaran-pusaran (*eddies*) yang saling berinteraksi secara dinamis (Rehman, 2019). Meskipun pertumbuhan linier berhenti pada tahap saturasi, turbulensi tetap bertahan dalam bentuk struktur vertikal yang terus berkontribusi terhadap transport anomali. Turbulensi ini tidak hanya meningkatkan transport, tetapi juga secara nonlinier menghasilkan struktur aliran skala besar yang dikenal sebagai aliran zonal. Aliran ini memiliki karakteristik fluktuasi medan listrik yang simetris dan menghasilkan aliran ($E \times B$) yang dominan dalam arah poloida, dengan simetri toroida dan poloida penuh ($n=m=0$). Aliran zonal membentuk lapisan geser kecepatan (*sheared flow*) dalam arah radial, yang mampu merusak dan memotong struktur pusaran turbulen. Mekanisme ini, yang sering disebut *shear suppression of turbulence*, merupakan salah satu kunci dalam pengurangan transport anomali, sebagaimana dibahas dalam literatur terbaru (Brochard et al., 2024). Tanpa keberadaan aliran zonal, turbulensi dapat berkembang tanpa kendali, menyebabkan peningkatan drastis kehilangan energi dan partikel dari plasma. Aliran zonal memiliki beberapa karakteristik mendasar yaitu:

- Didominasi oleh fluktuasi medan listrik murni yang menghasilkan aliran melingkar secara poloida
- Memiliki simetri penuh dalam arah toroida dan poloida ($n=m=0$)
- Tidak memerlukan pemicu eksternal karena terbentuk secara mandiri melalui interaksi nonlinier dalam turbulensi plasma.

Keberadaan dan dinamika aliran zonal inilah yang menjadi salah satu kunci dalam memahami serta mengendalikan transport anomali pada plasma terkurung magnetik.

Magnetohydrodynamics (MHD) sangat efektif dalam mendeskripsikan stabilitas makroskopis dan kesetimbangan plasma, tetapi memiliki keterbatasan mendasar karena mengasumsikan plasma sebagai fluida tunggal yang kontinu. Akibatnya, MHD gagal menangkap fenomena kinetik pada skala mikro, seperti turbulensi skala kecil yang terjadi pada orde jari-jari Larmor. Fenomena ini sangat krusial karena turbulensi pada skala tersebut mendominasi transport anomali yang menurunkan efisiensi pengurangan energi di dalam tokamak (Keppens et al., 2010). Untuk memahami dinamika tersebut, diperlukan deskripsi kinetik yang mencakup distribusi partikel dalam ruang fase 6D (tiga dimensi posisi dan tiga dimensi kecepatan) (Haverkort et al., 2016).

Teori *gyrokinetic* merupakan solusi untuk mengatasi hambatan komputasi 6D dengan memanfaatkan perbedaan skala antara gerak rotasi cepat partikel dan gerak layangan yang lebih lambat. Dengan mengasumsikan bahwa frekuensi gyro jauh lebih besar daripada frekuensi fluktuasi turbulensi, ketergantungan pada sudut fase dapat dihilangkan. Hal ini memungkinkan reduksi matematis dari ruang fase 6D menjadi 5D, yang terdiri dari tiga dimensi posisi *gyro-center*, kecepatan sejajar medan magnet ($v_{\parallel}$), dan momen magnetik (μ) sebagai invarian adiabatik (Frei et al., 2020).

Rotasi toroidal plasma sangat krusial karena berperan dalam meningkatkan efisiensi pengurangan plasma. Simulasi menunjukkan bahwa ketika terjadi gangguan magnetik yang cukup besar, lapisan magnetik stokastik terbentuk di dalam plasma yang menyebabkan transport elektron keluar jauh lebih cepat dibandingkan ion. Ketidakseimbangan transport ini menciptakan pemisahan muatan yang secara cepat membangkitkan medan listrik radial ambipolar (E_r). Medan listrik inilah yang menjadi penggerak utama bagi plasma untuk berotasi secara toroidal. Hasil simulasi menunjukkan bahwa rotasi plasma cenderung menyebar keluar dari wilayah di mana medan listrik radial bekerja. Fenomena ini menjelaskan profil rotasi yang teramati dalam eksperimen seringkali lebih luas daripada profil gangguan magnetik yang diberikan (You & Wang, 2024).

Dalam konteks pengembangan dan desain reaktor fusi skala besar, memahami mekanisme redaman turbulensi saja tidak cukup. Para ilmuwan juga harus mampu memprediksi secara makroskopis seberapa lama sebuah reaktor mampu mengurung energi. Parameter krusial ini dikenal sebagai waktu pengurangan energi (τ_E), yang mengukur durasi plasma dalam mempertahankan panasnya sebelum terdisipasi ke lingkungan sekitarnya. Berdasarkan basis data global ITER L-mode, para peneliti telah merumuskan persamaan *Scaling Laws* untuk memprediksi durasi ini pada desain eksperimen generasi berikutnya. Terdapat dua model utama yang dikembangkan: ITER89-P (*Power Law*) berbasis eksponensial yang mengintegrasikan 8 parameter operasi utama (massa isotop, arus plasma, jari-

jari mayor dan minor, elongasi, densitas plasma, medan magnet toroidal, dan daya pemanas), serta ITER89-OL (*Offset-Linear*) yang memisahkan perhitungan pemanasan ohmik dengan daya pemanas eksternal. Di antara keduanya, model *Power Law* lebih direkomendasikan karena ketidakpastian prediktifnya lebih kecil, terbukti dari kemampuannya merangkum data performa berbagai reaktor Tokamak di seluruh dunia ke dalam satu garis diagonal prediksi yang sangat akurat (Yushmanov et al., 1990).

3.3. Keseimbangan dan stabilitas magnetohidrodinamika (MHD) pada plasma

Dalam kondisi *steady state*, ketika efek inersia fluida dapat diabaikan, kesetimbangan plasma dalam kerangka manetodhidrodinamika (MHD) ditentukan oleh keseimbangan gaya lokal. Persamaan momentum MHD ideal disederhanakan menjadi kondisi keseimbangan statis mengikuti persamaan (7).

$$\mathbf{J} \times \mathbf{B} = \Delta p \quad (7)$$

dimana $\mathbf{J}$ adalah rapat arus, $\mathbf{B}$ adalah medan magnet, dan p adalah tekanan plasma yang diasumsikan isotropik. Persamaan ini menyatakan bahwa gaya Lorentz ($\mathbf{J} \times \mathbf{B}$) harus mengimbangi gradien tekanan plasma (Δp) di setiap titik dalam volume plasma (Adams Daniel et al., 2021). Dengan kata lain, kecenderungan plasma untuk mengembang akibat tekanan internal ditahan oleh gaya magnetik yang dihasilkan oleh arus dan medan magnet.

Untuk sistem dengan simetri aksial seperti tokamak ideal, struktur medan magnet dapat direpresentasikan lebih sederhana menggunakan fungsi fluks poloidal ψ dan fungsi arus poloidal $F(\psi)$. Dalam koordinat silinder (R, ϕ, Z), dengan ϕ sebagai arah toroidal, medan magnet memenuhi hukum Ampere ($\mu_0 \mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{B}$) dan kondisi bebas divergensi ($\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$). Dengan menggabungkan kedua hubungan ini ke dalam persamaan keseimbangan gaya, diperoleh suatu persamaan diferensial parsial eliptik nonlinier, dalam persamaan (8), yang dikenal sebagai Grad-Shafranov (Adams Daniel et al., 2021).

$$\Delta^* \psi = -\mu_0 R^2 \frac{dp}{d\psi} - F(\psi) \frac{dF}{d\psi} \quad (8)$$

operator Δ^* merupakan bentuk Laplacian termodifikasi untuk geometri toroidal, yang didefinisikan dalam persamaan (9).

$$\Delta^* = R \frac{\partial}{\partial R} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2}{\partial Z^2} \quad (9)$$

Ruas kiri persamaan (13) merepresentasikan distribusi rapat arus toroidal (J_ϕ), sedangkan ruas kanan terdiri dari dua mekanisme utama yang menjaga keseimbangan. Suku pertama ($-\mu_0 R^2 \frac{dp}{d\psi}$) berkaitan dengan gradien tekanan yang mendorong ekspansi plasma ke arah luar. Suku kedua ($-F(\psi) \frac{dF}{d\psi}$) menggambarkan kontribusi gaya magnetik akibat interaksi medan toroidal dan poloidal, yang dapat bersifat paramagnetik maupun diamagnetik tergabung pada profil arus.

Penyelesaian persamaan Grad-Shafranov menghasilkan distribusi fungsi fluks, yang secara langsung menentukan bentuk permukaan fluks magnetik ($\psi = \text{konstan}$), posisi sumbu magnetik, serta geometri keseluruhan plasma. Dalam praktiknya, profil $p(\psi)$ dan $F(\psi)$ tidak diketahui secara analitik dan diperlakukan sebagai fungsi bebas yang diperoleh dari hasil eksperimen atau simulasi transport. Oleh karena itu, solusi persamaan ini menjadi kunci dalam rekonstruksi kesetimbangan plasma pada eksperimen tokamak dan dalam desain reaktor fusi (Howell & Sovinec, 2014).

Faktor keamanan, dilambangkan sebagai $q(r)$, merupakan parameter kunci dalam fisika Tokamak yang mendeskripsikan geometri lilitan garis medan magnet di dalam plasma. Secara geometris, faktor ini didefinisikan sebagai rasio jumlah putaran toroidal terhadap satu putaran poloidal yang ditempuh oleh suatu garis medan magnet. Dalam pendekatan geometri torus besar (*large aspect ratio*), faktor keamanan dapat didekati dengan persamaan (10)

$$q \approx \frac{(r B \phi)}{(R B \theta)} \quad (10)$$

dengan r adalah jari-jari minor, R jari-jari mayor, $B\phi$ medan toroidal, dan $B\theta$ medan poloidal. Parameter ini menentukan kemiringan heliks garis medan magnet yang membentuk permukaan fluks tertutup. Nilai q yang cukup besar cenderung meningkatkan kestabilan terhadap instabilitas global, sedangkan nilai q yang terlalu kecil, khususnya di pusat atau tepi plasma, dapat memicu instabilitas MHD seperti *kink mode* dan *sawtooth oscillation*. Selain itu, permukaan rasional yang memenuhi kondisi $q = m/n$ (dengan m dan n bilangan bulat) menjadi lokasi resonansi potensial bagi *tearing mode* yang dapat mengubah topologi medan magnet melalui rekoneksi (Boozer, 2005).

Selain nilai absolut faktor keamanan, distribusi radial juga memainkan peranan yang sama pentingnya dalam menentukan stabilitas plasma. Perubahan q terhadap jari-jari dinyatakan melalui parameter geser magnetik (*magnetic shear*), yang didefinisikan dalam persamaan (11)

$$\hat{s} \approx \frac{(r)}{(q)} \frac{dq}{dr} \text{ atau ekuivalen dengan } \hat{s} \approx \frac{d \ln q}{d \ln r} \quad (11)$$

Secara fisik, *magnetic shear* mengukur seberapa cepat perubahan sudut lilitan garis medan magnet antar lapisan radial. Apabila profil q relatif datar ($dq/dr \approx 0$), maka garis medan pada berbagai radius memiliki orientasi yang hampir identik, sehingga gangguan dapat berkembang secara koheren dan memperkuat instabilitas. Sebaliknya, jika dq/dr cukup besar, perbedaan sudut antar lapisan menyebabkan fase gangguan berubah cepat sepanjang arah radial. Efek ini menghasilkan *phase mixing* yang mendistorsi struktur gangguan dan menghambat pertumbuhannya. Dengan demikian, *magnetic shear* berperan sebagai mekanisme stabilisasi alami dalam plasma terkurung magnetik (Chen et al., 2016).

Dari sudut pandang stabilitas MHD, kombinasi antara profil $q(r)$ dan *magnetic shear* menentukan spektrum mode yang dapat tumbuh dalam plasma. Permukaan rasional ($q = m/n$) menyediakan lokasi resonansi bagi *mode tearing*, sedangkan nilai *magnetic shear* di sekitar permukaan tersebut menentukan laju pertumbuhan serta evolusi nonliniernya. *Magnetic shear* yang rendah cenderung memfasilitasi pembentukan pulau magnetik berukuran besar, sementara nilai yang tinggi dapat membatasi kopling antar lapisan dan menekan perkembangan instabilitas. Oleh karena itu, pengendalian profil arus plasma (yang secara langsung mempengaruhi $q(r)$ dan gradiennya, menjadi aspek krusial dalam desain dan operasi tokamak modern untuk menjaga kestabilan global plasma.

Dalam kerangka Magnetohidrodinamika ideal, plasma diasumsikan memiliki konduktivitas listrik tak terhingga sehingga tidak ada difusi medan magnet akibat resistivitas. Konsekuensinya, berlaku prinsip *Frozen-in Flux*, yaitu garis medan magnet terikat pada elemen fluida dan bergerak bersamanya. Hal ini dinyatakan melalui persamaan induksi tanpa variabel difusi, persamaan (12) (Derakhshan & Hosseinpour, 2026).

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (v \times B) + \eta \nabla^2 B \quad (12)$$

Suku tambahan $\eta \nabla^2 B$ merepresentasikan difusi medan magnet sekaligus disipasi energi magnetik, yang secara fisik termanifestasi sebagai pemanasan Joule (*Ohmic heating*). Efek ini menjadi sangat penting pada plasma dengan konduktivitas terbatas, terutama di daerah dengan gradien medan yang tajam (Derakhshan & Hosseinpour, 2026).

Konsekuensi penting dari keberadaan resistivitas adalah munculnya fenomena rekoneksi magnetik, yang tidak mungkin terjadi dalam model MHD ideal. Rekoneksi terjadi ketika garis-garis medan magnet yang berlawanan arah dipaksa berdekatan dalam suatu lapisan tipis (*current sheet*), kemudian mengalami pemutusan dan penyambungan ulang dengan topologi baru. Proses ini disertai pelepasan energi magnetik menjadi energi kinetik dan termal plasma dalam skala signifikan. Dalam konteks Tokamak, rekoneksi magnetik berperan dalam pembentukan *tearing mode*, yang berkaitan erat dengan profil faktor keamanan $q(r)$ dan *magnetic shear*. Mode ini dapat merusak permukaan fluks magnetik dan menurunkan kualitas kurungan plasma.

Untuk memahami gangguan tersebut akan berkembang atau teredam, analisis stabilitas MHD biasanya dimulai dengan pendekatan linier. Dalam pendekatan ini, setiap besaran fisik dinyatakan sebagai superposisi antara keadaan setimbang dan perturbasi kecil. Pada fase linier, jika sistem tidak stabil, amplitudo gangguan akan tumbuh secara eksponensial dengan laju pertumbuhan γ . Pertumbuhan ini mencerminkan konversi energi dari keadaan setimbang ke energi gangguan (Derakhshan & Hosseinpour, 2026). Pada aplikasi Tokamak, analisis linear sangat penting untuk membedakan antara *classical tearing modes*, yang tidak stabil sejak tahap linier akibat gangguan infinitesimal, dan *neoclassical tearing modes*, yang pada awalnya stabil secara linier tetapi dapat menjadi tidak stabil setelah memasuki fase nonlinier akibat efek transport dan *bootstrap current* (Sweeney et al., 2020).

Kriteria kuantitatif untuk kestabilan linier sering dirumuskan melalui prinsip energi (δW). Metode ini menyatakan bahwa suatu konfigurasi plasma stabil jika perubahan energi potensial akibat perpindahan elemen fluida ξ bernilai positif ($\delta W > 0$) untuk semua kemungkinan gangguan. Sebaliknya jika $\delta W < 0$, sistem memiliki kecenderungan melepaskan energi untuk memperkuat gangguan, sehingga memicu instabilitas makroskopik. Secara sistematis (persamaan (13)), prinsip energi dinyatakan dalam bentuk integral fungsional yang menggambarkan kompetisi antara gaya pemulih dan gaya pendorong instabilitas, sehingga memberikan dasar teori yang kuat dalam analisis dan kontrol kestabilan plasma (Bernstein et al., 1958).

$$\delta W = \frac{1}{2} \int \left[\frac{|B_1|^2}{\mu_0} - j_0 \cdot (B_1 \times \xi) + \gamma p_0 (\nabla \cdot \xi)^2 + (\nabla \cdot \xi)(\xi \cdot \nabla p_0) \right] d\tau \quad (13)$$

Suku pertama di dalam integral merepresentasikan energi magnetik yang cenderung menstabilkan, sedangkan suku kedua yang melibatkan rapat arus setimbang (j_0) yang sering menjadi sumber ketidakstabilan *kink* (Sweeney et

al., 2020). Pada MHD resistif, mekanisme energi diperluas dengan memperhitungkan kerja aliran fluida terhadap medan magnet ($-V \cdot (J \times B)$) sebagai mekanisme utama pembangkitan energi dan amplifikasi medan magnet selama fase ketidakstabilan berlangsung (Derakhshan & Hosseinpour, 2026).

Disrupsi pada tokamak merupakan gangguan makroskopik yang sangat merusak, ditandai oleh hilangnya keseimbangan MHD secara cepat sehingga plasma tidak terkungkung oleh medan magnet dalam skala waktu yang singkat (orde milidetik). Peristiwa ini tidak hanya menyebabkan pelepasan energi yang besar ke dinding reaktor, tetapi juga dapat menimbulkan gaya elektromagnetik dan beban termal yang signifikan pada struktur perangkat. Secara umum, disrupsi berlangsung melalui dua fase utama yang saling berkesinambungan, yaitu *thermal quench* dan *current quench*, yang mencerminkan evolusi dari hilangnya energi termal hingga runtuhnya arus plasma.

Pada fase *thermal quench*, energi termal plasma dilepaskan secara tiba-tiba akibat pertumbuhan instabilitas MHD nonlinier, seperti *tearing mode* dan *kink mode*. Instabilitas ini memicu rekoneksi magnetik yang mengubah topologi medan magnet, sehingga energi yang tersimpan dalam plasma dengan cepat dikonversi menjadi radiasi dan aliran partikel ke dinding. Akibatnya, suhu plasma turun secara drastis dalam waktu sangat singkat. Penurunan suhu ini memiliki implikasi penting terhadap sifat transport plasma, khususnya peningkatan resistivitas listrik yang mengikuti hubungan $\eta \propto T^{-3/2}$. Peningkatan resistivitas ini kemudian mendorong sistem memasuki fase berikutnya yaitu *current quench*. Pada fase *current quench*, arus plasma menurun dengan cepat akibat meningkatnya resistivitas dan hilangnya kemampuan plasma untuk menopang arus melalui mekanisme konduksi. Penurunan arus ini menghasilkan medan listrik induksi toroidal yang besar sesuai dengan hukum induksi elektromagnetik, yang pada gilirannya dapat mempercepat elektron hingga energi relativistik dan membentuk runaway electrons. Elektron berenergi tinggi ini menjadi salah satu resiko utama karena dapat merusak komponen internal tokamak jika tidak dikendalikan.

Dari perspektif prinsip dasar MHD, disrupsi dipahami sebagai konsekuensi dari hilangnya stabilitas kesetimbangan plasma yang dijelaskan oleh teori stabilitas energi dan persamaan kesetimbangan magnetik. Parameter-parameter kunci seperti profil faktor keamanan (*q-profile*), *magnetic shear*, dan gradien tekanan memainkan peran penting dalam menentukan batas stabilitas. Ketika parameter-parameter ini melampaui ambang stabilitas linier, gangguan kecil dalam plasma dapat berkembang menjadi instabilitas nonlinier berskala global (Chen et al., 2016). Dalam rezim nonlinier tersebut, rekoneksi magnetik tidak hanya bersifat lokal, tetapi juga menyebabkan perubahan topologi medan magnet secara menyeluruh, disertai redistribusi arus dan tekanan plasma.

Sebagai konsekuensinya, sistem tidak lagi mampu mempertahankan konfigurasi magnetik awalnya. Dengan demikian, disrupsi dapat dipandang sebagai sebagai transisi dinamis dari keadaan setimbang metastabil menuju keadaan dengan energi magnetik yang lebih rendah. Energi yang dilepaskan selama proses ini muncul dalam berbagai bentuk, termasuk panas yang terdepositasi pada dinding, gaya elektromagnetik pada struktur, serta partikel berenergi tinggi. Pemahaman mendalam mengenai mekanisme ini menjadi penting dalam pengembangan strategi mitigasi disrupsi guna meningkatkan keandalan operasi Tokamak di masa depan (Sweeney et al., 2020).

3.4. Interaksi gelombang-partikel dan pembangkitan arus pada plasma

Interaksi gelombang-partikel merupakan mekanisme dasar dalam plasma termagnetisasi, khususnya pada perangkat fusi seperti tokamak. Dalam sistem ini, gelombang elektromagnetik (terutama pada rentang radio-frequency (rf)) tidak hanya berfungsi untuk memanaskan plasma, tetapi juga dapat mentransfer energi dan momentum ke partikel bermuatan. Transfer ini dapat menghasilkan arus listrik terarah tanpa bergantung pada induksi transformator, yang dikenal sebagai arus non-induktif. Mekanisme ini menjadi dasar untuk mewujudkan operasi steady-state pada tokamak, karena memungkinkan keberlanjutan arus plasma dalam jangka panjang tanpa keterbatasan fluks magnet eksternal (Fisch, 1987).

Proses transfer energi dan momentum tersebut berlangsung melalui kondisi resonansi tertentu antara gelombang dan partikel. Dua mekanisme utama yang sering dibahas adalah peredaman Landau dan resonansi siklotron. Pada peredaman Landau, gelombang berinteraksi secara selektif dengan partikel yang memiliki kecepatan fasa gelombang, sehingga terjadi pertukaran energi tanpa melibatkan tumbukan. Sementara itu, resonansi siklotron terjadi ketika frekuensi gelombang mendekati frekuensi gerak melingkar partikel di sekitar gari medan magnet. Selain mekanisme resonansi ini, perambatan gelombang RF dalam plasma juga sangat dipengaruhi oleh medan magnet eksternal, yang menyebabkan plasma bersifat anisotropik. Akibatnya, karakteristik mode rambat, polarisasi gelombang, serta relasi dispersi menjadi lebih kompleks dan memerlukan analisis khusus berbasis teori gelombang dalam plasma termagnetisasi (Cheverry & Fontaine, 2018).

Untuk menjelaskan bagaimana spektrum gelombang memodifikasi distribusi partikel, digunakan pendekatan teori kuasilinier. Dalam kerangka ini, interaksi gelombang-partikel dipandang sebagai difusi dalam ruang kecepatan, yang secara bertahap mengubah distribusi momentum partikel. Pendekatan ini menjembatani dinamika mikroskopik (interaksi resonansi individu) dengan respons makroskopik plasma, seperti pembangkitan arus dan

perubahan profil distribusi energi. Di sisi lain, penting untuk dicatat bahwa arus dalam tokamak tidak hanya berasal dari mekanisme eksternal, tetapi juga dapat terbentuk secara intrinsik melalui arus *bootstrap*, yang dipicu oleh gradien tekanan dan dijelaskan dalam kerangka transport neoklasik. Kombinasi antara arus *bootstrap* dan arus non-induktif berbasis gelombang menjadi strategi utama dalam desain operasi tokamak modern (Sauter, Angioni, & Lin-Liu, 1999).

Dalam artikel klasik *Theory of Current Drive in Plasmas*, Fisch (Fisch, 1987) menempatkan peredaman Landau sebagai salah satu mekanisme kunci dalam membangkitkan arus non-induktif. Peredaman Landau dipahami sebagai proses dimana gelombang diserap oleh partikel yang bergerak resonan dengan kecepatan fasa gelombang, sehingga terjadi pertukaran energi dan momentum secara selektif tanpa keterlibatan tumbukan. Lebih lanjut, Fisch menunjukkan bahwa interaksi resonan ini menghasilkan distorsi asimetris pada distribusi momentum elektron sepanjang arah medan magnet. Asimetri inilah yang kemudian memunculkan arus listrik makroskopik. Dalam kerangka kinetik tersebut, peredaman Landau tidak hanya berfungsi sebagai mekanisme redaman gelombang, tetapi juga alat yang efisien untuk mentransfer momentum dari gelombang RF ke populasi elektron tertentu. Hal ini menjadi dasar teoretis bagi skema *lower hybrid current drive* (LHCD), di mana gelombang *lower hybrid* dimanfaatkan untuk menghasilkan distribusi kecepatan elektron yang sangat tidak simetris. Tingkat asimetri ini secara langsung menentukan efisiensi pembangkitan arus, sehingga optimasi parameter gelombang, seperti spektrum parallel dan frekuensi, menjadi aspek krusial dalam aplikasi praktisnya. Dengan demikian, interaksi gelombang-partikel tidak hanya berperan dalam pemanasan plasma, tetapi juga menjadi fondasi utama dalam pengendalian arus dan stabilitas pada tokamak generasi lanjut (Fisch, 1987).

Keberhasilan mekanisme peredaman Landau dalam membangkitkan arus pada plasma termagnetisasi pada dasarnya ditentukan oleh kemampuan gelombang untuk memilih secara selektif populasi partikel di dalam ruang kecepatan (Howes et al., 2018). Secara fisis, proses ini sering dianalogikan seperti peselancar yang menangkap momentum ombak: elektron dengan kecepatan sejajar medan magnet sedikit di bawah kecepatan fasa gelombang akan menyerap energi dari gelombang dan dipercepat ke arah rambatnya. Proses ini menghasilkan distorsi asimetris pada fungsi distribusi kecepatan, yang kemudian memunculkan arus listrik makroskopik searah medan magnet. Dengan demikian, selektivitas interaksi ini menjadi kunci efisiensi *current drive* berbasis gelombang.

Dalam kerangka kinetik, interaksi antara gelombang dan partikel mencapai intensitas maksimum hanya ketika memenuhi kondisi sinkronisasi yang dikenal sebagai resonansi Landau, yaitu saat kecepatan partikel sejajar medan magnet ($v_{||}$) mendekati kecepatan fasa gelombang (Howes et al., 2018). Kondisi ini dapat dinyatakan secara matematis pada persamaan (14).

$$\omega - k_{||}v_{||} = 0 \quad (14)$$

dimana (ω) adalah frekuensi sudut gelombang elektromagnetik yang merambat dalam plasma, $k_{||}$ adalah komponen bilangan gelombang sejajar dengan medan magnet eksternal, dan $v_{||}$ adalah komponen kecepatan partikel (umumnya elektron) pada arah yang sama. Kondisi ini menyiratkan bahwa dalam kerangka acuan yang bergerak dengan kecepatan fasa gelombang ($\omega/k_{||}$), partikel yang memenuhi persamaan tersebut akan tampak diam dan mengalami medan listrik gelombang yang hampir konstan. akibatnya, terjadi transfer energi yang bersifat non-osilatori (neto) dan efisien antara gelombang dan partikel. Mekanisme inilah yang mendasari peredaman Landau sekaligus memungkinkan percepatan selektif partikel dalam plasma.

Keterkaitan antara resonansi ini dan dinamika plasma menjadi lebih jelas ketika dibandingkan dengan resonansi siklotron yang melibatkan sinkronisasi antara frekuensi gelombang dan gerak melingkar (*gyro motion*) partikel di sekitar garis medan magnet. Berbeda dengan resonansi Landau yang terutama memodifikasi kecepatan sejajar, resonansi siklotron mula-mula meningkatkan energi gerak tegak lurus terhadap medan. Namun demikian, seperti dijelaskan oleh Fisch (1987), melalui efek tumbukan yang selektif serta koreksi relativistic, redistribusi energi ini tetap dapat menghasilkan kontribusi netto terhadap arus sejajar. Dengan menargetkan partikel-partikel berenergi tinggi (jauh di atas kecepatan termal), frekuensi tumbukan efektif dapat ditekankan, sehingga arus yang dihasilkan menjadi tahan lama dan efisien. Secara matematis, kondisi resonansi siklotron dan efisiensi pembangkitan arus dinyatakan dalam persamaan (15) dan (16).

$$\omega - k_{||}v_{||} = n\Omega_c \quad (15)$$

$$J/P = \frac{\mathbf{s} \cdot \nabla v_X}{\mathbf{s} \cdot \nabla v_E} \quad (16)$$

Pada persamaan (15), ω adalah frekuensi gelombang, $k_{||}$ adalah bilangan gelombang sejajar medan magnet, dan $v_{||}$ adalah kecepatan partikel sejajar medan. Adapun Ω_c adalah frekuensi siklotron partikel, yaitu frekuensi alami partikel berputar mengelilingi garis medan magnet, dan n adalah bilangan bulat (... , -2, -1, 0, 1, 2, ...) yang menunjukkan harmonik resonansi. Interaksi terkuat biasanya terjadi pada $n = \pm 1$ (resonansi fundamental), ketika gelombang secara efektif mengikuti gerak rotasi partikel. Sementara itu, persamaan (16) menggambarkan efisiensi pembangkitan arus, di mana rasio J/P menyatakan besarnya rapat arus yang dihasilkan per satuan daya gelombang

yang diserap plasma. Dalam hal ini, $\hat{s}$ adalah vektor satuan dalam ruang kecepatan yang menunjukkan arah fluks kuasi-linear, ∇_v adalah operator gradien dalam ruang kecepatan, χ adalah fungsi distribusi partikel, dan E adalah energi partikel. Rasio ini menentukan seberapa efektif energi gelombang dikonversi menjadi momentum terarah (arus), dibandingkan hanya memanaskan plasma.

Perambatan gelombang RF dalam plasma termagnetisasi memiliki karakteristik yang berbeda dibandingkan dengan propagasi di ruang hampa maupun plasma tanpa medan magnet. Dalam plasma tak termagnetisasi, perilaku gelombang terutama ditentukan oleh frekuensi plasma, yang menghasilkan kondisi *cutoff* ketika frekuensi gelombang lebih kecil dari frekuensi plasma (Chen et al., 2016). Pada kondisi ini, gelombang tidak dapat merambat dan akan dipantulkan. Ketika medan magnet eksternal diterapkan, gerak partikel bermuatan menjadi terikat pada garis medan magnet dan mengalami gerak melingkar dengan frekuensi siklotron. Kehadiran medan magnet menyebabkan respons plasma terhadap gelombang elektromagnetik menjadi anisotropik, sehingga karakteristik perambatan bergantung pada arah propagasi relatif terhadap medan magnet (Cheverry & Fontaine, 2018). Dalam pendekatan plasma dingin (*cold plasma approximation*), sifat dielektrik plasma tidak lagi dapat direpresentasikan sebagai scalar, melainkan sebagai tensor. Formulasi tensor ini menghasilkan beragam mode gelombang dengan karakteristik propagasi yang berbeda-beda.

Untuk propagasi sejajar medan magnet, muncul dua mode polarisasi melingkar, yaitu *right-hand* (R) dan *left-hand* (L), yang masing-masing berinteraksi berbeda dengan partikel bermuatan. Sementara itu, untuk propagasi tegak lurus medan magnet, dikenal *ordinary mode* (O-mode) dan *extraordinary mode* (X-mode). Setiap mode memiliki relasi dispersi, kondisi *cutoff*, serta karakteristik resonansi yang khas (Cheverry & Fontaine, 2018). Struktur dispersi inilah yang menentukan apakah suatu gelombang dapat merambat secara bebas, mengalami refleksi pada lapisan tertentu, atau justru diserap oleh plasma melalui mekanisme resonansi.

Kondisi resonansi terjadi ketika frekuensi gelombang mendekati frekuensi alami gerak partikel, seperti frekuensi siklotron, sehingga memungkinkan transfer energi yang efisien melalui interaksi gelombang-partikel (Fisch, 1987). Oleh karena itu, pemahaman mengenai perambatan gelombang RF dalam plasma termagnetisasi menjadi landasan penting dalam analisis pemanasan plasma dan pembangkitan arus non-induktif pada sistem fusi magnetik.

Teori kuasilinear, yang dirumuskan pada awal tahun 1960-an oleh Vedenov, Velikov, Sagdeev serta Drummond dan Pines, merupakan pendekatan medan rata-rata pertama yang sistematis untuk memahami turbulensi plasma. Dalam perspektif termodinamika, teori ini menjelaskan bagaimana sistem plasma yang jauh dari kesetimbangan berevolusi dengan mendisipasi energi bebas yang tersimpan dalam fungsi distribusi partikel, baik berupa struktur ruang kecepatan maupun gradien spasial, menjadi energi fluktuasi gelombang dan akhirnya terelaksasi menuju keadaan stabil atau marginal. Proses ini analog dengan konveksi Rayleigh-Bénard, di mana energi potensial gravitasi diubah menjadi energi kinetik konveksi. Namun, di dalam plasma, mekanismenya jauh lebih rumit karena melibatkan resonansi gelombang-partikel dan produksi entropi melalui gerak acak partikel (Ashourvan & Candy, 2024).

Salah satu pertanyaan mendasar dalam teori kuasilinear adalah asal-usul irreversibilitas yang memungkinkan adanya difusi dan produksi entropi. Persamaan Vlasov yang mendasari dinamika plasma tanpa tumbukan bersifat reversibel dan mempertahankan entropi. Kunci jawabannya terletak pada konsep *coarse-graining* dan kekacauan orbit partikel (Catto, 2020). Ketika spektrum gelombang cukup lebar, pulau-pulau resonansi dalam ruang fase dapat saling tumpang tindih, memenuhi kriteria Chirikov. Akibatnya, partikel tidak lagi terperangkap dalam satu resonansi, melainkan dapat meloncat secara acak antar resonansi, menghasilkan gerak yang stokastik dan irreversibel. Dalam kondisi tumpang tindih, separatriks hancur dan partikel mengalami difusi dalam ruang kecepatan. Proses inilah yang mendasari persamaan difusi kuasilinear dan produksi entropi Kolmogorov-Sinai yang positif. Dengan demikian, irreversibilitas bukan berasal dari asumsi fasa acak, melainkan dari sifat dinamika partikel yang kacau (Catto, 2020).

Untuk kebutuhan simulasi tokamak, salah satu model klasik yang paling luas digunakan adalah formulasi analitik yang dikembangkan oleh Sauter dkk. (1999). Model ini populer karena bentuknya yang relatif sederhana, komputasinya cepat, serta mampu mencakup berbagai rezim tumbukan, sehingga sangat praktis untuk implementasi dalam kode transport (Sauter, Angioni, Hazeltine, et al., 1999). Namun demikian, pada kondisi tertentu, khususnya di daerah tepi plasma yang ditandai gradien tajam dan parameter kolisionalitas yang ekstrim, akurasi formula analitik ini turun. Dalam konteks ini, model Sauter sering dilaporkan cenderung melebihi prediksi. Karena itu Redl dkk. (2021) menyusun formula baru. Struktur persamaannya tetap dibuat mudah dipakai untuk simulasi, tapi *fitting*-nya mengacu pada *solver drift-kinetic multi-species* (NEO). Pendekatan ini memungkinkan peningkatan akurasi, terutama pada kondisi plasma yang lebih kompleks dan tidak homogen, tanpa mengorbankan kemudahan implementasi dalam simulasi numerik (Redl et al., 2021).

Keterkaitan antara model transport dan mekanisme pembangkitan arus menjadi semakin penting dalam konteks skema *non-inductive current driven*, seperti *Neutral Beam Injection* (NBI) (Voitsekhovitch et al., 2009). Dalam skema ini, efisiensi pembangkitan arus sangat ditentukan oleh bagaimana partikel netral berenergi tinggi mentransfer momentum setelah mengalami ionisasi di dalam plasma. Secara fisis, partikel-partikel ini tidak langsung berhenti setelah terionisasi, melainkan mengalami proses perlambatan (*slowing down*) akibat tumbukan berulang dengan elektron dan ion latar. Selama proses ini, partikel cepat tetap bergerak dominan searah medan magnet, sehingga gaya seret (*drag force*) yang mereka alami menghasilkan kontribusi netto terhadap arus plasma. Berbeda dengan mekanisme berbasis gelombang yang mengandalkan resonansi, dinamika NBI lebih tepat dijelaskan melalui evolusi fungsi distribusi kecepatan partikel cepat yang mengalami perlambatan akibat tumbukan. Secara matematis, fungsi distribusi partikel cepat dalam region slowing-down dapat dinyatakan dalam persamaan (17) (Gaffey, 1976).

$$f_b(v) = \frac{S\tau_s}{4\pi(v^3 + v_c^3)} \quad (17)$$

dimana $f_b(v)$ merepresentasikan fungsi distribusi kecepatan ion cepat hasil injeksi berkas netral. S adalah laju sumber partikel cepat per satuan volume, yang menggambarkan tingkat ionisasi berkas netral di dalam plasma, sedangkan τ_s adalah waktu perlambatan karakteristik yang menggambarkan skala waktu hilangnya energi partikel akibat tumbukan. Variable v menyatakan kecepatan partikel cepat, dan v_c adalah kecepatan kritis (*critical velocity*), yaitu batas dimana laju transfer energi ke elektron sebanding dengan laju transfer energi ke ion. Bentuk distribusi yang berbanding terbalik ($v^3 + v_c^3$) menunjukkan bahwa populasi partikel cepat terakumulasi pada rentang kecepatan tinggi hingga mendekati v_c , sebelum akhirnya mengalami penurunan energi yang signifikan. Dengan demikian, profil distribusi ini mencerminkan keseimbangan antara proses injeksi (sumber) dan mekanisme perlambatan akibat tumbukan, yang pada Akhirnya menentukan efisiensi pembangkitan arus oleh NBI.

4. KESIMPULAN

Pengembangan tokamak sebagai sumber energi fusi menuntut pemahaman yang terintegrasi terhadap berbagai fenomena fisika plasma, mulai dari skala mikroskopik hingga makroskopik. Pengurungan magnetik dalam sistem toroidal aksisimetris menunjukkan bahwa dinamika partikel tunggal, melalui pendekatan *guiding-center* dan gyrokinetik, berperan penting dalam membentuk perilaku kolektif plasma. Namun, kinerja pengurungan dibatasi oleh proses transport, khususnya turbulensi yang memicu kehilangan energi secara signifikan. Di sisi lain, kesetimbangan dan stabilitas magnetohidrodinamika menentukan keberlangsungan operasi plasma dalam kondisi ekstrem. Interaksi gelombang-partikel juga memberikan mekanisme efektif untuk pemanasan dan pembangkitan arus non-induktif. Oleh karena itu, keberhasilan tokamak sangat bergantung pada kemampuan mengendalikan interaksi kompleks antar fenomena tersebut. Dengan kemajuan teori, simulasi, dan eksperimen, tokamak tetap menjadi kandidat utama dalam mewujudkan energi bersih, berkelanjutan, dan berkapasitas besar bagi kebutuhan energi masa depan dunia.

REFERENCES

- Åberg, A. (2021). The ways and means of ITER: reciprocity and compromise in fusion science diplomacy. *History and Technology*, 37(1), 106–124. <https://doi.org/10.1080/07341512.2021.1891851>
- Adams Daniel, D., Haavaan Mishi, A., Owoje Love, J., Ruth John, P., Deborah Amos, A., Samuel Yaula, D., & Author, C. (2021). Derivation and Applications of Grad-Shafranov Equation InMagnetohydrodynamics(MHD). *Quest Journals Journal of Research in Applied Mathematics*, 7(4), 2394–0735. www.questjournals.org
- Ashourvan, A., & Candy, J. (2024). Breakdown of Quasilinear Theory in the Tokamak Edge. *Physical Review Letters*, 132(20). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.205101>
- Belmont, G., Rezeau, L., Riconda, C., & Zaslavsky, A. B. T.-I. to P. P. (2019a). 1 - *What Is Plasma?* (pp. 1–32). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-306-6.50001-9>
- Belmont, G., Rezeau, L., Riconda, C., & Zaslavsky, A. B. T.-I. to P. P. (2019b). 2 - *Individual Trajectories in an Electromagnetic Field* (pp. 33–55). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-306-6.50002-0>
- Bernstein, I. B., Frieman, E. A., Kruskal, M. D., & Kulsrud, R. M. (1958). An energy principle for hydromagnetic stability problems. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 244(1236), 17–40. <https://doi.org/10.1098/rspa.1958.0023>

- Boozer, A. H. (2005). Physics of magnetically confined plasmas. *Reviews of Modern Physics*, 76(4), 1071–1141. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.76.1071>
- Brizard, A. J., & Duthoit, F.-X. (2014). Canonical transformation for trapped/passing guiding-center orbits in axisymmetric tokamak geometry. *Physics of Plasmas*, 21(5), 52509. <https://doi.org/10.1063/1.4879811>
- Brochard, G., Liu, C., Wei, X., Heidbrink, W., Lin, Z., Gorelenkov, N., Chrystal, C., Du, X., Bao, J., Polevoi, A. R., Schneider, M., Kim, S. H., Pinches, S. D., Liu, P., Nicolau, J. H., & Lütjens, H. (2024). Saturation of Fishbone Instability by Self-Generated Zonal Flows in Tokamak Plasmas. *Physical Review Letters*, 132(7), 1–6. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.075101>
- Catling, D. C., Krissansen-Totton, J., & Robinson, T. D. (2025). Potential Technosignature from Anomalously Low Deuterium/Hydrogen in Planetary Water Depleted by Nuclear Fusion Technology. *The Astrophysical Journal*, 979(2), 137. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad99a9>
- Catto, P. J. (2020). Collisional effects on resonant particles in quasilinear theory. *Journal of Plasma Physics*, 86(3), 815860302. [https://doi.org/DOI: 10.1017/S0022377820000355](https://doi.org/DOI:10.1017/S0022377820000355)
- Catto, P. J., & Simakov, A. N. (2009). Pfirsch–Schlüter electric field in a tokamak. *Physics of Plasmas*, 16(4), 44509. <https://doi.org/10.1063/1.3124139>
- Chen, S. L., Villone, F., Xiao, B. J., Barbato, L., Luo, Z. P., Liu, L., Mastrostefano, S., & Xing, Z. (2016). 3D passive stabilization of $n = 0$ MHD modes in EAST tokamak. *Scientific Reports*, 6(1), 32440. <https://doi.org/10.1038/srep32440>
- Cheverry, C., & Fontaine, A. (2018). Dispersion relations in hot magnetized plasmas. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 466(2), 1238–1280. <https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2018.06.045>
- Derakhshan, N., & Hosseinpour, M. (2026). How does the plasma resistivity affect the dynamics of magnetized shear-flow driven instability? *Fundamental Plasma Physics*, 17, 100109. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fpp.2026.100109>
- Doyle, E. J., Houlberg, W. A., Kamada, Y., Mukhovatov, V., Osborne, T. H., Polevoi, A., Bateman, G., Connor, J. W., Cordey, J. G., Fujita, T., Garbet, X., Hahn, T. S., Horton, L. D., Hubbard, A. E., Imbeaux, F., Jenko, F., Kinsey, J. E., Kishimoto, Y., Li, J., ... Group, I. P. and E. T. (2007). Chapter 2: Plasma confinement and transport. *Nuclear Fusion*, 47(6), S18. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/47/6/S02>
- Fisch, N. J. (1987). Theory of current drive in plasmas. *Reviews of Modern Physics*, 59(1), 175–234. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.59.175>
- Frei, B. J., Jorge, R., & Ricci, P. (2020). A gyrokinetic model for the plasma periphery of tokamak devices. *Journal of Plasma Physics*, 86(2). <https://doi.org/10.1017/S0022377820000100>
- Gaffey, J. D. (1976). Energetic ion distribution resulting from neutral beam injection in tokamaks. *Journal of Plasma Physics*, 16(2), 149–169. [https://doi.org/DOI: 10.1017/S0022377800020134](https://doi.org/DOI:10.1017/S0022377800020134)
- Gao, Z. (2016). Compact magnetic confinement fusion: Spherical torus and compact torus. *Matter and Radiation at Extremes*, 1(3), 153–162. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mre.2016.05.004>
- Garbet, X. (2006). Introduction to turbulent transport in fusion plasmas. *Comptes Rendus Physique*, 7(6), 573–583. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2006.06.002>
- Haverkort, J. W., de Blank, H. J., Huysmans, G. T. A., Pratt, J., & Koren, B. (2016). Implementation of the full viscoresistive magnetohydrodynamic equations in a nonlinear finite element code. *Journal of Computational Physics*, 316, 281–302. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcp.2016.04.007>
- Helander, P. (2012). Classical and neoclassical transport in tokamaks. *Fusion Science and Technology*, 61(2 T), 133–141. <https://doi.org/10.13182/fst12-a13500>
- Hinton, F. L., & Hazeltine, R. D. (1976). Theory of plasma transport in toroidal confinement systems. *Reviews of Modern Physics*, 48(2), 239–308. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.48.239>
- Hong, B. G., Jo, G., Kwon, J. M., & Her, N. (2026). Impact of physics and technology on the design of a compact tokamak fusion device. *Fusion Engineering and Design*, 227(September 2025). <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2026.115713>
- Howell, E. C., & Sovinec, C. R. (2014). Solving the Grad–Shafranov equation with spectral elements. *Computer Physics Communications*, 185(5), 1415–1421. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cpc.2014.02.008>

- Howes, G. G., McCubbin, A. J., & Klein, K. G. (2018). Spatially localized particle energization by Landau damping in current sheets produced by strong Alfvén wave collisions. *Journal of Plasma Physics*, 84(1), 1–39. <https://doi.org/10.1017/s0022377818000053>
- Jmal, S., Tacchi-Bénard, M., & Witrant, E. (2026). Optimal control of H-mode tokamak plasma temperature based on Pontryagin's principle. *Control Engineering Practice*, 172(November 2025), 106919. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2026.106919>
- Johnson, R. W. (2011). Critical evaluation of the neoclassical model for the equilibrium electrostatic field in a tokamak. *Mechanics Research Communications*, 38(2), 146–151. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2011.01.007>
- Keppens, R., Goedbloed, J. P., & Blokland, J. W. S. (2010). Magnetohydrodynamic Modeling for Fusion Plasmas. *Fusion Science and Technology*, 57(2T), 137–147. <https://doi.org/10.13182/FST10-A9404>
- Kumar, R., Ranjan, V., Raj, H., Jadeja, K., Patel, K., Tanna, R. L., & Ghosh, J. (2026). Strategies and solutions for engineering challenges during the assembly of divertor and position control coils in ADITYA-U tokamak. *Fusion Engineering and Design*, 224(October 2025), 115615. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2026.115615>
- Li, C. Y., Zheng, P. W., Gong, X. Y., Gao, Z. K., & Jiang, X. C. (2025). Numerical studies on electron cyclotron resonance heating and optimization in the CN-H1 stellarator. *Nuclear Engineering and Technology*, 57(7), 103487. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.net.2025.103487>
- Ludvig-Osipov, A., Yadykin, D., & Strand, P. (2025). High-order implicit solver in conservative formulation for tokamak plasma transport equations. *Computer Physics Communications*, 311(December 2024), 109570. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2025.109570>
- Post, D., Putvinskaya, N., Perkins, F. W., & Nevins, W. (1995). Analytic criteria for power exhaust in divertors due to impurity radiation. *Journal of Nuclear Materials*, 220–222, 1014–1018. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-3115\(94\)00464-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-3115(94)00464-1)
- Pusztai, I., & Catto, P. J. (2010). Neoclassical plateau regime transport in a tokamak pedestal. *37th EPS Conference on Plasma Physics 2010, EPS 2010, 1*, 509–512. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/52/11/119801>
- Redl, A., Angioni, C., Belli, E., Sauter, O., Team, A. U., & Team, Euro. M. (2021). A new set of analytical formulae for the computation of the bootstrap current and the neoclassical conductivity in tokamaks. *Physics of Plasmas*, 28(2), 22502. <https://doi.org/10.1063/5.0012664>
- Rehman, U. (2019). Electromagnetic Viscous-Resistive-Drift-Wave Instability in Burning Plasma. *Journal of Fusion Energy*, 38(5), 531–538. <https://doi.org/10.1007/s10894-019-00219-3>
- Sauter, O., Angioni, C., Hazeltine, R. D., & Introduction, I. (1999). ' ' ' ' . *Phys. Plasmas*, 6(7), 2834–2840.
- Sauter, O., Angioni, C., & Lin-Liu, Y. R. (1999). Neoclassical conductivity and bootstrap current formulas for general axisymmetric equilibria and arbitrary collisionality regime. *Physics of Plasmas*, 6(7), 2834–2839. <https://doi.org/10.1063/1.873240>
- Scott, B. D. (2002). The nonlinear drift wave instability and its role in tokamak edge turbulence. *New Journal of Physics*, 4. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/4/1/352>
- Spitzer, L. J. (1958). The Stellarator Concept. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 9, 130–141. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:11748652>
- Sweeney, R., Creely, A. J., Doody, J., Fülöp, T., Garnier, D. T., Granetz, R., Greenwald, M., Hesslow, L., Irby, J., Izzo, V. A., La Haye, R. J., Logan, N. C., Montes, K., Paz-Soldan, C., Rea, C., Tinguely, R. A., Vallhagen, O., & Zhu, J. (2020). MHD stability and disruptions in the SPARC tokamak. *Journal of Plasma Physics*, 86(5), 865860507. <https://doi.org/DOI: 10.1017/S0022377820001129>
- Velasco, J. L., Calvo, I., Parra, F. I., & García-Regaña, J. M. (2020). KNOSOS: A fast orbit-averaging neoclassical code for stellarator geometry. *Journal of Computational Physics*, 418, 109512. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcp.2020.109512>
- Viswanathan, B. B. T.-E. S. (2017). *Chapter 6 - Nuclear Fusion* (pp. 127–137). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-444-56353-8.00006-X>
- Voitsekhovitch, I., Alper, B., Brix, M., Budny, R. V., Buratti, P., Challis, C. D., Ferron, J., Giroud, C., Joffrin, E.,

- Laborde, L., Luce, T. C., McCune, D., Menard, J., Murakami, M., Park, J. M., & contributors, J.-E. (2009). Non-inductive current drive and transport in high β_N plasmas in JET. *Nuclear Fusion*, 49(5), 55026. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/49/5/055026>
- Wei, L., Ren, G., Wang, Z. X., Li, J., & Yu, F. (2023). Electromagnetic drift wave instability in tokamak plasmas with strong pedestal gradient. *Nuclear Fusion*, 63(9). <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ace5bf>
- Yang, S., Zhu, P., Xie, J., & Liu, W. (2018). Two-fluid MHD regime of resistive drift-wave instability. *Physics of Plasmas*, 25(9). <https://doi.org/10.1063/1.5043323>
- You, J., & Wang, S. (2024). Gyrokinetic simulation of the toroidal rotation driven by the ambipolar radial electric field induced by stochastic magnetic perturbations in a tokamak plasma. *Physics of Plasmas*, 31(10). <https://doi.org/10.1063/5.0221759>
- Yushmanov, P. N., Takizuka, T., Riedel, K. S., Kardaun, O. J. W. F., Cordey, J. G., Kaye, S. M., & Post, D. E. (1990). Scalings for tokamak energy confinement. *Nuclear Fusion*, 30(10), 1999. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/30/10/001>