

Telaah Model Inti Sebagai Dasar Pemahaman Energi Ikat dan Stabilitas Atom

Audya Taqillah¹, Chairatul Umamah², dan Wilda Musyarrofah³

^{1,2,3}Program Studi Pendidikan Fisika, Fakultas keguruan dan ilmu pendidikan Universitas Islam Madura, Indonesia

Email Coressponedensi Outhor: audyatq@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara komprehensif berbagai model inti atom, mulai dari pendekatan klasik seperti model tetes cair (LDM) dan model cangkang (Shell Model), hingga pendekatan modern berbasis teori fungsional kerapatan (DFT) dan konsep geometri fraktal, dalam kaitannya dengan pemahaman energi ikat (NBE) dan stabilitas atom. LDM menganalogikan inti sebagai tetesan cairan, menghitung energi ikat melalui kontribusi makroskopik, dan berhasil menangkap trend NBE untuk inti sedang hingga berat. Shell model sukses memprediksi sifat inti stabil dan angka ajaib yang menandakan penutupan *subshell* nuklir. Penelitian ini berfokus pada analisis kekuatan dan keterbatasan tiap model dalam menjelaskan fenomena inti, terutama pada inti berat dan inti jauh dari garis stabilitas yang masih menimbulkan ketidakpastian teoritis maupun empiris. Penelitian ini menyimpulkan bahwa tidak ada model inti tunggal yang universal yang memberikan akurasi konsisten diseluruh rentang massa atom. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan kerangka kerja model inti yang tersintesis dan terfundamental melalui evaluasi komparatif multidomain yang sistematis. Tujuannya adalah untuk menjembatani kesenjangan antara prediksi teoritis dengan data eksperimen (seperti dari FRIB atau CERN), memberikan panduan teoritis yang signifikan bagi penelitian fisika inti dimasa depan, serta menunjukkan relevansi praktis pemahaman stabilitas atom dalam mendukung aplikasi nuklir kontemporer.

Kata-kata kunci: *Model inti; Energi ikat; Stabilitas atom.*

PENDAHULUAN

Konsep atom, sebagai unit fundamental pembentuk materi, telah melalui proses evolusi teoritis yang dramatis, bertransisi dari bola padat yang tak terbagi (*atomos*) menjadi entitas mekanika kuantum yang kompleks. Model atom awal, seperti yang dikemukakan oleh Dalton, Thomson, dan Rutherford, meskipun revolusioner pada masanya, memiliki keterbatasan signifikan, terutama dalam menjelaskan kestabilan elektron dan spektrum atom multi elektron. Lompatan yang sesungguhnya terjadi pada awal abad ke-20 dengan mengembangkan model atom mekanika kuantum atau atom modern. Namun, model atom modern menolak lintasan orbit yang pasti, menggantikannya dengan orbital, yaitu daerah ruang di sekitar inti atom dengan probabilitas tertinggi untuk menemukan elektron, yang dijelaskan melalui solusi persamaan Schrodinger. Prinsip-prinsip kuantum ini, termasuk dualisme gelombang partikel dan prinsip ketidak pastian Heisenberg, tidak hanya menjadi fondasi dalam kimia dan fisika, tetapi juga berperan sebagai motor penggerak teknologi *frontier* di era kontemporer.

Berbagai model teoritis telah dikembangkan untuk memodelkan perilaku inti atom, masing-masing menawarkan perspektif unik meskipun dengan batasan inheren. Model tetesan cair (liquid drop model), yang pertama kali diusulkan oleh Weizsäcker pada 1935,

menganalogikan inti sebagai tetesan cairan tak kompresibel, di mana energi ikat dihitung melalui kontribusi volume, permukaan, Coulomb, asimetri, dan pasangan. di mana jumlah proton dan koefisien dapat merepresentasikan kekuatan interaksi masing-masing. Model ini berhasil menangkap tren makroskopik energi ikat untuk inti sedang hingga berat, tetapi gagal dalam menjelaskan fluktuasi halus seperti angka ajaib (*magic numbers*) yang menandakan penutupan subshell nuklir. Sebaliknya, model cangkang (*shell model*), yang dikembangkan oleh Mayer dan Jensen pada 1949, memperlakukan nukleon sebagai partikel independen dalam potensial rata-rata, mirip dengan model elektron dalam atom, sehingga mampu memprediksi sifat-sifat seperti spin dan paritas inti stabil. Namun, model ini kurang efektif untuk inti deformasi atau yang jauh dari kestabilan. Pendekatan modern seperti teori fungsional densitas (*density functional theory*, DFT) berbasis pada prinsip-prinsip mekanika kuantum banyak-tubuh, menggunakan aproksimasi seperti Skyrme-Hartree-Fock untuk menghitung distribusi densitas nukleon, yang memberikan akurasi lebih tinggi untuk spektrum energi tetapi memerlukan komputasi intensif dan masih menghadapi tantangan dalam menangani korelasi kuat antar-nukleon (Butera, 2024). Secara keseluruhan, meskipun model-model ini telah merevolusi pemahaman kita, keterbatasannya semakin nyata ketika diterapkan pada inti di wilayah "dataran" (*valley of stability*) atau lebih ekstrem, seperti inti neutron-rich yang relevan untuk astrofisika nuklir.

Penerapan konsep geometri fraktal dalam fisika inti telah membuka paradigma baru untuk memahami struktur dan stabilitas nuklir. Penelitian menunjukkan bahwa inti atom dapat dipandang sebagai objek fraktal, dimana dimensi fraktal (D_f) berfungsi sebagai parameter fisik fundamental yang melengkapi variabel tradisional seperti jari-jari inti. Beberapa studi mengusulkan bahwa nilai D_f memiliki korelasi langsung dengan energi ikat dan stabilitas inti, dengan inti-inti magis (*magic nuclei*) menunjukkan nilai dimensi fraktal kritis tertentu yang mencerminkan konfigurasi kelopak tertutup yang stabil. Pendekatan ini tidak hanya mampu merepresentasikan bentuk inti yang tidak beraturan secara lebih akurat, tetapi juga memberikan landasan matematis untuk memprediksi mode peluruhan dan menjelaskan anomali struktural pada inti-inti yang jauh dari garis kestabilan.

Pendekatan modern dalam studi fundamental materi, seperti yang dieksplorasi dalam konteks katalisis (Butera, 2024) dan rekayasa formulasi farmasi (Guan et al., 2025) di dominasi oleh teori fungsional kerapatan (*density functional theory* – DFT). DFT adalah metode mekanika kuantum yang revolusioner karena ia secara fundamental menggantikan kesulitan perhitungan fungsi gelombang multi partikel yang rumit dengan variabel yang jauh lebih sederhana dan mendasar, yaitu kerapatan elektron (ρ). Inti dari pendekatan ini adalah penyelesaian persamaan kohn-sham, yang memungkinkan para ilmuwan untuk mengelucidasi mekanisme interaksi molekuler dan menghitung properti sistem materi melalui perhitungan mekanika kuantum yang presisi. Keunggulan DFT terletak pada efisiensinya dalam memberikan wawasan mendalam pada tingkat atomistik- sebuah aspek yang sulit atau mustahil di akses melalui eksperimen saja. Kemampuan DFT untuk memodelkan sistem yang kompleks dengan tingkat akurasi tinggi membuatnya menjadi alat universal, sukses tidak hanya dalam memprediksi efisiensi katalik dan memahami jalur reaksi (Butera, 2024), tetapi

juga dalam merancang formulasi obat yang optimal dengan menganalisis stabilitas, solubilitas, dan interaksi obat pelarut (Guan et al., 2025).

Meskipun pencapaian signifikan telah diraih, terdapat kesenjangan pengetahuan yang mencolok, khususnya dalam mengintegrasikan pendekatan teoritis dengan data empiris dari akselerator partikel seperti Facility for Rare Isotope Beams (FRIB) atau eksperimen di CERN. Model klasik seperti liquid drop model dapat mereproduksi tren umum energi ikat dengan akurasi sekitar 1-2% untuk inti stabil, tetapi deviasi mencapai 5-10% untuk inti berat (seperti transuranium elements) atau inti sangat kaya neutron (neutron drip-line nuclei), di mana efek shell menjadi tidak stabil dan kontribusi tensor force dari meson exchange mendominasi (Lakshminarayana, 2020). Hal ini menghambat prediksi proses seperti r-process nucleosynthesis di supernova, yang bergantung pada laju pembentukan inti tidak stabil. Lebih lanjut, paradigma inovatif seperti penerapan geometri fraktal dalam struktur inti yang mengusulkan bahwa distribusi nukleon menunjukkan pola self-similar pada skala mikroskopik, mirip dengan fraktal di alam menjanjikan penjelasan baru untuk anomali energi ikat di inti eksotik. Konsep ini, yang diungkapkan oleh teori chaos kuantum, dapat dimodelkan melalui dimensi fraktal approx 2.5-3.0 untuk permukaan inti, tetapi memerlukan validasi melalui simulasi ab initio dan data spektroskopi (Zheng et al., 2025). Kesenjangan ini menekankan perlunya metodologi hibrida yang menggabungkan elemen dari model semi-empiris dengan komputasi kuantum.

Sedangkan kebaruan penelitian ini terletak pada pendekatan evaluasi komparatif multidomain yang sistematis dan inklusif (*systematic and inclusive multidomain comparative evaluation*). Artikel ini tidak hanya membandingkan model-model inti tradisional, tetapi juga mengintegrasikan dan memetakan model teoritis yang beragam- termasuk model data-driven dan model baru- dengan data pendukung empiris spesifik berdasarkan domain nuklida dan energi. Kebaruan ini dicapai melalui: 1) Telaah skala energi/massa: menguji akurasi prediksi model (LDM, SEMF modifikasi, Ab Initio < Data-Driven) pada tiga domain berbeda: inti ringan (melawan data energi keadaan dasar), inti stabil (melawan kurva NBE global), dan inti superberat (melawan data koreksi kulit dan hambatan fisi (Narzary et al., 2025). 2) integrasi pendekatan: mensinkronkan model berbasis prinsip fisik dengan akurasi model data-driven untuk menguji apakah model terakhir mencerminkan parameter fisik mendasar. Kontribusi orisinal dari penelitian ini adalah mengusulkan kerangka kerja model inti yang trsintesis dan terfundamental (*synthesized and fundamental nuclear model framework*). kerangka kerja ini akan secara eksplisit mengidentifikasi model atau kombinasi model yang paling efektif dan konsisten dalam menjelaskan NBE dan stabilitas atom, memberikan kontribusi signifikan sebagai panduan teo ritis bagi penelitian fisika ini dimasa depan.

Tujuan dari telaah ini adalah untuk mengkaji secara komprehensif berbagai model inti, mulai dari pendekatan klasik seperti *liquid drop model* dan *shell model* hingga pendekatan modern berbasis *density functional theory* dan *konsep geometri fraktal*, dalam kaitannya dengan pemahaman energi ikat dan stabilitas atom. Telaah ini berfokus pada analisis kekuatan dan keterbatasan tiap model dalam menjelaskan fenomena inti, terutama pada inti berat dan inti jauh dari garis stabilitas yang masih menimbulkan ketidakpastian teoretis maupun

empiris. Selain itu, kajian ini dimaksudkan untuk memperjelas arah perkembangan metodologi yang lebih integratif, sehingga mampu menjembatani kesenjangan antara prediksi teoritis dan hasil eksperimen. Lebih jauh, pembahasan diharapkan dapat menunjukkan relevansi praktis pemahaman energi ikat dan stabilitas atom dalam mendukung aplikasi nuklir kontemporer, baik pada bidang energi, kesehatan, maupun rekayasa material. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menegaskan signifikansi teoritis, tetapi juga membuka peluang inovasi lintas disiplin dalam pengembangan teknologi nuklir yang aman, efisien, dan berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Jenis penelitian

Penelitian ini merupakan jenis penelitian kualitatif dengan desain studi literatur sistematis (*Systematic Literature Review*). Pendekatan ini dipilih untuk melakukan telaah, analisis, dan sintesis komprehensif terhadap berbagai model inti atom yang telah dipublikasikan guna memahami dasar energi ikat nuklir (NBE) dan stabilitas atom.

Subjek penelitian

Subjek dalam penelitian ini adalah literatur ilmiah yang relevan dengan model inti atom, energi ikat, dan stabilitas nuklir. Sumber data diperoleh dari basis data ilmiah utama seperti Scopus, ISSN, dan Sinta. Fokus pencarian diarahkan pada publikasi mutakhir antara tahun 2020 hingga 2025 untuk menangkap perkembangan terbaru seperti model hibrida, teori fungsional kerapatan (DFT), dan geometri fraktal.

Instrumen

Instrumen utama dalam penelitian ini adalah peneliti sendiri (*human instrumen*) yang dibantu dengan tiga aspek yaitu: 1) Protokol Seleksi Pustaka yang berupa kriteria inklusi untuk memilih artikel yang membahas LDM, *Shell Model*, DFT, dan model fraktal. 2) Tabel Ekstraksi Data yang digunakan untuk memetakan temuan dari berbagai penulis, tahun terbit, hasil utama, dan jurnal terkait. 3) Panduan Evaluasi Komparatif yang merupakan kriteria untuk menguji akurasi prediksi model pada domain inti ringan, stabil, dan superberat.

Prosedur pengumpulan data

Pengumpulan data dilakukan melalui tahapan sistematis sebagai berikut:

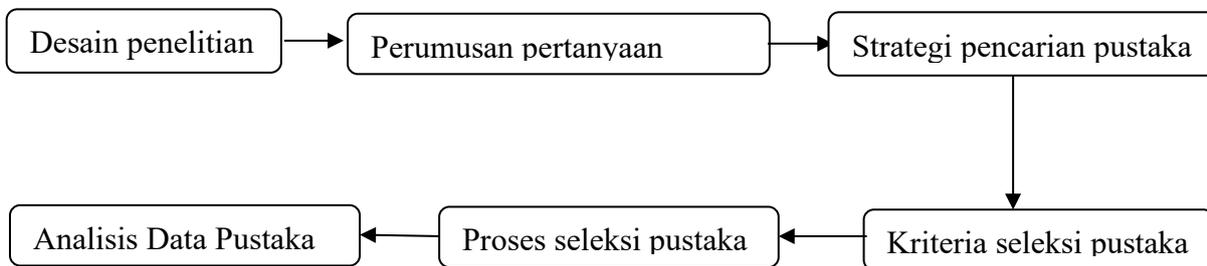
1. Perumusan Pertanyaan: Menentukan fokus telaah mengenai kekuatan dan keterbatasan model inti.
2. Strategi Pencarian: Menggunakan kata kunci seperti “Model Inti”, “Energi ikat”, dan “Stabilitas atom” pada basis data digital.
3. Seleksi Pustaka: Menyaring literatur berdasarkan relevansi terhadap variabel energi ikat nukleon (NBE) dan data eksperimen terbaru (misalnya data dari FRIB atau CERN).

Analisis data

Analisis data dilakukan melalui teknik sintesis naratif dan evaluasi komparatif multidomain. Langkah-langkahnya meliputi:

1. Reduksi Data: Mengekstraksi koefisien massa semi empiris dan parameter stabilitas dari literatur terpilih.
2. Komparasi: Membandingkan kemampuan model klasik (seperti LDM) dengan model modern (seperti DFT dan fraktal) dalam memprediksi kurva energi ikat per nukleon.
3. Sintesis: mengintegrasikan model berbasis prinsip fisik dengan model data-driven untuk mengidentifikasi kerangka kerja model yang paling konsisten dan universal.

Desain penelitian



Gambar 1. Bagan penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan telaah komparatif ini, penelitian ini menyimpulkan bahwa tidak ada model inti tunggal yang universal yang mampu memberikan akurasi konsisten diseluruh jangkauan massa atom dan skala energi. Sintesis ini menawarkan pemahaman NBE yang berlapis, mengakui bahwa fenomena inti termasuk potensi relevansi paradigma baru seperti geometri fraktal dalam menjelaskan NBE dan bilangan ajaib.

Tabel 1. Hasil kajian literature

No	Penulis	Tahun	Hasil	Jurnal
1.	(Yang & Zhao, 2022).	2022	Untuk inti ringan (model Ab Initio): penelitian memanfaatkan data energi keadaan dasar eksperimental untuk menguji model relativistic hamiltonian yang mencakup efek relativistic dan interaksi tiga nukleon. Akurasi model ditentukan oleh kemampuannya untuk memproduksi nilai energi keadaan dasar ini secara tepat	<i>Physics Letters, Section B: Nuclear, Elementary Particle and High-Energy Physics</i>
2.	(Narzary et al., 2025	2025	Untuk inti berat dan super berat	<i>Journal of</i>

- 2025).
- (koreksi kulit): data yang digunakan mencakup pengaruh energi koreksi kulit (Eshell) terhadap hambatan fisi dan distribusi massa fragmen fisi inti aktinida dan superberat pada energi eksitasi rendah hingga menengah. Data ini menguji bagaimana efek kuantum (model kulit) berinteraksi dengan sifat kolektif (model tetes cair)
3. (Mahmoud & 2025 Academy, 2025) Data NBE dan parameter stabilitas inti global: nilai NBE $B(A,Z)$, yang terukur secara eksperimental untuk berbagai nuklida stabil dan tidak stabil. Data ini menjadi acuan umum untuk menguji validitas model tetes cair/SEMF, model nuklir modifikasi, dan model data-driven di seluruh tabel nuklida
4. (Haci, 2025) 2025 Pendekatan fraktal geometri menawarkan paradigma baru untuk kestabilan inti atom menggunakan dimensi fraktal (D_f). Inti stabil (magis memiliki $D_f = 1,44$). Defiasi D_f pada inti eksotik berkorelasi dengan umur peluruhan yang singkat. Model inii mereproduksi energi ikat secara akurat dan memprediksi pulau kestabilan superberat.
5. (Mahmoud & 2025 Academy, 2025) Energi ikat nuklir merupakan konsep sentral yang mendukung pemahaman stabilitas inti atom, proses fisi dan fusi nuklir, serta berbagai aplikasi praktis seperti pembangkit listrik, kedokteran, dan astrophysics. Meskipun telah banyak di kaji, tantangan tetap ada berupa kompleksitas model teoritis dan kebutuhan untuk pengukuran yang lebih presisi.
6. (Moscato & 2024 Grebogi, 2024) Penelitian ini mengembangkan metode Continuous Fraction Regression (cf-r) untuk memodelkan energi ikat nuklir
- Subatomic Particles and Cosmology*
- Ahmed Ragab Mahmoud Salah Shorouk Academy – Department of Engineering.*
- Engrxiv.*
- Research gate*
- Scientific Reports*

- dengan akurasi tinggi, mampu memperkirakan energi nuklir secara lebih andal dan melampaui model tradisional, terutama untuk nuklida dengan massa kecil dan besar.
7. (Brown, 2022) 2022 Artikel ini meninjau penerapan model cangkang nuklir untuk memahami struktur dan sifat nuklei yang dekat dengan batas keberadaan proton dan neutron (garis drip). Kesimpulannya, konsep nomor ajaib tetap penting dalam menjelaskan kestabilan nuklei, meskipun di wilayah ekstrem ini fenomena seperti halo neutron, celah cangkang yang menurun, dan inversi konfigurasi menunjukkan wilayah baru yang kompleks dan menarik. Perkembangan eksperimen dan teori terus memperdalam pemahaman tentang struktur inti nuklir di daerah batas tersebut *Physics (Switzerland)*
 8. (Butera, 2024) 2024 Teori fungsi kerapatan (DFT) menjadi alat yang sangat kuat untuk mempelajari dan memprediksi reaktivitas material katalitik, memberikan pemahaman mendalam tentang mekanisme reaksi katalitik yang sulit di akses secara eksperimental. *Research gate*
 9. (aldawdy & Al-jomaily, 2022) 2022 penambahan istilah shell dan faktor nukleon valensi ke dalam Model Drop Cairan (LDM) dapat meningkatkan akurasi prediksi energi ikatan nuklir, terutama untuk nuklei dengan angka magic. Pendekatan ini menunjukkan bahwa model menjadi lebih sesuai dengan data eksperimen dan memungkinkan interpretasi yang lebih baik tentang struktur dan kestabilan nuklei. *Arab Journal of Nuclear Sciences and Applications. Ajnsa.journals.ekb.eg*
 10. (Moscato & Grebogi, 2024) 2024 Pendekatan baru yang menggunakan Regresi Deret *Scientific Reports*

- Kontinuasi (Continued Fraction Regression) mampu memperkirakan energi ikat nuklir dengan tingkat akurasi yang tinggi, terutama untuk unsur dengan angka massa $A \geq 200$. Metode ini mampu menghasilkan prediksi yang residual nya kurang dari 0,15 MeV dan memiliki kemampuan extrapolasi yang baik hingga batas massa nuklir.
11. (Lakshminarayana, 2020) 2020 Dokumen ini mengeksplorasi hubungan antara stabilitas nuklir dan energi ikat, dengan fokus pada konstanta kopling kuat dan koefisien baru yang terkait dengan stabilitas nuklir. Dokumen ini menggunakan rumus massa semi-empiris untuk memperkirakan jumlah nukleon stabil dan energi ikat untuk nuklida stabil maupun tidak stabil berdasarkan jumlah protonnya. Temuan ini berkontribusi pada pemahaman yang lebih mendalam tentang interaksi dan energetika nuklir, dengan implikasi potensial untuk memprediksi isotop superberat. *Mapana Journal of Sciences*
12. (Otsuka, 2022) 2022 Penelitian ini membahas kemajuan pemahaman struktur nuklir melalui model shell, menekankan bahwa inti atom lebih kompleks dari pada yang diperkirakan sebelumnya. Penelitian menunjukkan evolusi shell yang dipengaruhi oleh interaksi monopole dan fenomena-fenomena seperti koeksistensi bentuk, dan dinamika intinya yang eksotik. Penulis menyoroti bahwa interaksi monopole-kuadrupole kolektif nuklir dan batasan driplines. <https://doi.org/10.3390/physics4010018>
13. (Hashimoto, 2021) 2021 Potensi mean-field mirip model shell dari profil kerapatan nuklir yang diperoleh melalui teori *Physical Review D*

- efektif multibaryon holografik, menunjukkan bahwa energi pengikatan per nukleon mendekati nilai konstan yang tidak tergantung pada massa jenis saat meningkat. Perhitungan numerik yang dilakukan menunjukkan bahwa energi pengikatan yang dihasilkan konsisten dengan nilai eksperimen, menggarisbawahi efektivitas pendekatan holografik dalam memahami fisika nuklir. Penelitian ini menyoroti potensi holografik QCD untuk menyatukan berbagai aspek perilaku nuklir dan memberikan prediksi yang akurat mengenai sifat sistem nuklir.
14. (Cziráki, 2023) 2023 Penelitian ini mengeksplorasi stabilitas inti atom melalui model proton dan neutron yang diperbarui. Model baru ini menekankan peran penting elektron terdelokalisasi yang terpisah dari neutron luar dalam menentukan energi ikatan inti. Peningkatan neutron juga meningkatkan kerapatan elektron rata-rata yang penting untuk menstabilkan inti yang lebih besar. *Natural Science*
<https://www.scirp.org/journal/ns>
15. (Sariyal & Mazumdar, 2023) 2023 Berdasarkan isi dokumen ini, kesimpulannya adalah bahwa model statistik CASCADE berhasil menghitung energi ikat dan distribusi tingkat energi nuklir secara akurat dengan membandingkan nilai kalkulasi dengan data eksperimen dari evaluasi massa atom terbaru (AME-2020). Model ini juga menyediakan analisis tentang distribusi sudut momentum fusi dan density tingkat energi yang penting dalam studi reaksi nuklir, serta menunjukkan bahwa parameter seperti energi ikat dan *EPJ Web of Conferences*
-

distribusi sudut sangat
berpengaruh dalam prediksi hasil
reaksi nuklir.

KESIMPULAN

Penelitian ini menyajikan telaah komprehensif mengenai model inti atom yang berbeda, mulai dari pendekatan klasik seperti Model Tetes Cair (LDM) dan model cangkang (Shell Model), hingga pendekatan modern seperti teori fungsional kerapatan (DFT) dan konsep Geometri fraktal, dengan tujuan memahami energi ikat nukleon (NBE) dan stabilitas atom. Model tetes cair, yang menghitung NBE melalui kontribusi volume, permukaan, coulomb, asimetri, dan pasangan, berhasil menangkap trend makroskopik energi ikat namun gagal menjelaskan angka ajaib (*magic numbers*). Sebaliknya, Model Cangkang mampu memprediksi sifat-sifat inti stabil dan angka ajaib, tetapi kurang efektif untuk inti deformasi atau yang jauh dari kestabilan. Model modern seperti DFT dan Geometri Fraktal menawarkan akurasi yang lebih tinggi dan paradigma baru. DFT menggunakan kerapatan elektron (ρ) untuk menghitung properti sistem materi, sementara Geometri Fraktal mengusulkan bahwa inti dapat dipandang sebagai objek fraktal dengan dimensi fraktal (D_f) yang berkorelasi dengan stabilitas dan energi ikat, bahkan memprediksi pulau kestabilan superberat. Secara keseluruhan, telaah ini menyimpulkan bahwa tidak ada model tunggal yang universal yang mampu memberikan akurasi konsisten diseluruh jangkauan massa atom dan skala energi. Kesenjangan pengetahuan terbesar terletak pada perlunya metodologi hibrida yang mengintegrasikan model-model beragam ini dengan data empiris spesifik dari eksperimen terbaru, untuk menjembatani perbedaan antara prediksi teoritis dan hasil observasi, serta mendukung aplikasi nuklir kontemporer. Meskipun model-model ini telah merevolusi pemahaman, keterbatasannya semakin nyata ketika diterapkan pada inti yang jauh dari “dataran kestabilan” (valley of stability) atau inti kaya neutron. Pendekatan modern seperti DFT menawarkan akurasi tinggi dengan menggantikan perhitungan fungsi gelombang yang rumit dengan variabel kerapatan, sementara konsep geometri fraktal menyajikan paradigma baru menunjukkan bahwa inti dapat dipandang sebagai objek fraktal dengan dimensi fraktal (D_f) yang berkorelasi dengan energi ikat stabilitas, bahkan memprediksi pulau kestabilan superberat.

REFERENSI

- aldawdy, fadwa, & Al-jomaily, F. (2022). Fitting the Nuclear Binding Energy Coefficients for Liquid Drop Model and Adding a mathematical terms to the Closed Shell of Magic Nuclei. *Arab Journal of Nuclear Sciences and Applications*, 55(4), 150–160. <https://doi.org/10.21608/ajnsa.2022.135860.1574>
- Brown, B. A. (2022). The Nuclear Shell Model towards the Drip Lines. *Physics (Switzerland)*, 4(2), 525–547. <https://doi.org/10.3390/physics4020035>

- Butera, V. (2024). Density functional theory methods applied to homogeneous and heterogeneous catalysis: a short review and a practical user guide. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 26(10), 7950–7970. <https://doi.org/10.1039/d4cp00266k>
- Czirák, Á. (2023). *Stability of Nuclei Based on the New Proton and Neutron Model*. 15(12), 289–299.
- Guan, H., Sun, H., & Zhao, X. (2025). Application of Density Functional Theory to Molecular Engineering of Pharmaceutical Formulations. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(7). <https://doi.org/10.3390/ijms26073262>
- Hacı, S. (2025). *Fractal Geometry in Atomic Nuclei : A New Paradigm Sogukpınar Hacı To cite this version : HAL Id : hal-05175756*.
- Hashimoto, K. (2021). Nuclear binding energy in holographic QCD. *Physical Review D*, 104(2), 26006. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.104.026006>
- Lakshminarayana, S. (2020). Understanding Nuclear Stability and Binding Energy with Powers of the Strong Coupling Constant. *Mapana Journal of Sciences*, 19(1), 35–70.
- Mahmoud, A. R., & Academy, E. S. (2025). *Nuclear Binding Energy Concepts , Calculations , and Applications Prepared by : Ahmed Ragab Mahmoud Salah Shorouk Academy – Department of Engineering. June*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22720.03848>
- Moscato, P., & Grebogi, R. (2024). Approximating the nuclear binding energy using analytic continued fractions. *Scientific Reports*, 14(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61389-5>
- Narzary, G., Bhuyan, M., & Kalita, K. (2025). Unraveling the effects of shell correction energy in the fission fragments of actinide and superheavy nuclei. *Journal of Subatomic Particles and Cosmology*, 4(July), 100106. <https://doi.org/10.1016/j.jspc.2025.100106>
- Otsuka, T. (2022). *Emerging Concepts in Nuclear Structure Based on the Shell Model*. 258–285.
- Sariyal, R., & Mazumdar, I. (2023). Comparison of binding energy from Atomic Mass Evaluation (AME-2020) with statistical model calculations. *EPJ Web of Conferences*, 03022, 2020–2023.
- Yang, Y. L., & Zhao, P. W. (2022). A consistent description of the relativistic effects and three-body interactions in atomic nuclei. *Physics Letters, Section B: Nuclear, Elementary Particle and High-Energy Physics*, 835, 137587. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2022.137587>
- Zheng, H., Zhang, X., Hu, J., Xu, Y., Lei, G., Liu, S., Li, H., Cui, Z., Zhu, Y., Li, X., Liu, X., Geng, S., Chen, X., Liu, H., Wang, X., Liu, H., Cheng, J., & Tang, C. (2025). Effect of Cs atoms adsorption on the work function of the LaB₆ (100) surface. *Nuclear Materials and Energy*, 42(December 2024), 101863. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2025.101863>