

## Analisis Kuantitatif Model SEMF: Studi Perbandingan Terhadap Data Eksperimen Massa Nuklida

Mardiana Napirah<sup>1\*</sup>, Sayahdin Alfat<sup>1</sup>, Naim<sup>1</sup>, Abdin<sup>2</sup>, Wa Ode Israwati<sup>1</sup>, Zaldin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Pendidikan Fisika, Universitas Halu Oleo, Kendari, Indonesia

<sup>2</sup>Program Studi Pendidikan Vokasional Teknik Elektronika, Universitas Halu Oleo, Kendari, Indonesia

### Abstrak

*Semiempirical Mass Formula* (SEMF) merupakan salah satu model teoretis yang digunakan untuk memperkirakan massa inti dan energi ikat nuklida. Meskipun sederhana, akurasi SEMF sangat bergantung pada nilai parameter yang digunakan. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja beberapa set parameter SEMF dari literatur berbeda dalam memprediksi massa nuklida ringan stabil. Data eksperimen diambil dari *Atomic Mass Evaluation* (AME2020), sedangkan perhitungan teoretis dilakukan menggunakan SEMF dengan empat set parameter berbeda. Evaluasi kuantitatif dilakukan dengan menghitung selisih massa ( $\Delta M$ ), *error* absolut ( $|\Delta M|$ ), dan *mean absolute error* (MAE). Seluruh perhitungan dilakukan menggunakan *Microsoft Excel* 2021 dengan presisi bawaan *double-precision*, tanpa pembulatan manual maupun penggunaan makro, sehingga operasi aritmetika berlangsung konsisten melalui formula standar *spreadsheet*. Hasil analisis menunjukkan adanya variasi akurasi antar model. Model IV memberikan performa terbaik dengan nilai MAE terkecil, yaitu 0,00199 u, yang konsisten dengan kecenderungan selisih massa dan *error* absolut yang lebih kecil. Temuan ini menunjukkan bahwa untuk nuklida ringan stabil pada rentang  $A = 1$  hingga  $A = 55$ , model tanpa suku *pairing* justru menghasilkan prediksi massa yang lebih baik. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa SEMF tetap relevan digunakan dalam studi massa nuklida, dan bahwa pembaruan atau reevaluasi parameter perlu dilakukan untuk memastikan ketepatan model dalam era data massa berpresisi tinggi.

Masuk:

19 Agustus 2025

Diterima:

23 Desember 2025

Diterbitkan:

31 Desember 2025

### Kata kunci:

Analisis kuantitatif, massa nuklida, nuklida ringan stabil, *Semiempirical Mass Formula*, studi perbandingan.

### PENDAHULUAN

Prediksi massa inti atom merupakan aspek fundamental dalam fisika nuklir, dengan aplikasi luas pada studi kestabilan nuklida, nukleosintesis bintang, serta perancangan dan pengoperasian reaktor nuklir (Guo dkk., 2022; Yüksel dkk., 2024). Berbagai model teoretis telah dikembangkan untuk memperkirakan massa inti, mulai dari pendekatan parametrik sederhana seperti *Semiempirical Mass Formula* (SEMF)

hingga metode canggih berbasis mikroskopik seperti *Finite Range Droplet Model* (FRDM) dan *Hartree-Fock-Bogoliubov* (HFB) (Hein dkk., 2022; Kasuya & Yoshida, 2021; Yiu dkk., 2024). Meskipun model-model kompleks tersebut menawarkan presisi tinggi, model seperti SEMF tetap relevan karena kesederhanaannya, transparansi fisik, dan kemudahan implementasi.

Model SEMF, yang pertama kali diperkenalkan oleh Carl Friedrich von

\*Korespondensi: Mardiana Napirah  [mardiana.napirah@uho.ac.id](mailto:mardiana.napirah@uho.ac.id)  Universitas Halu Oleo, Jalan H.E.A. Mokodompit, Kodya Kendari, Sulawesi Tenggara, Indonesia.

Weizsäcker, menyatakan bahwa energi ikat inti dapat dijelaskan oleh lima kontribusi utama: volume, permukaan, Coulomb, asimetri, dan pasangan (Krane, 1988). Parameter-parameter dalam model ini diperoleh melalui *fitting* terhadap data eksperimen. Seiring waktu, berbagai versi parameter SEMF telah dikembangkan, masing-masing dengan tingkat akurasi yang berbeda dalam merepresentasikan data inti (Ankita & Suthar, 2016; Benzaid dkk., 2020; Pinedo-Vega dkk., 2016). Oleh karena itu, evaluasi kuantitatif terhadap kinerja berbagai set parameter ini penting untuk memahami keterbatasan dan keunggulan masing-masing pendekatan.

Meskipun SEMF telah menjadi acuan fundamental selama beberapa dekade, validitas parameter-parameter historisnya tidak otomatis tetap sesuai dengan kebutuhan analisis masa kini. Hal ini karena parameter lama umumnya diturunkan dari cakupan data yang lebih sempit dan teknologi eksperimental yang belum seteliti sekarang (Gjorgievska dkk., 2024). Di sisi lain, rilis *Atomic Mass Evaluation* (AME) terbaru menyediakan basis data massa yang jauh lebih lengkap sehingga memungkinkan pengujian kembali apakah parameter klasik tersebut masih memberikan hasil yang konsisten, khususnya untuk nuklida ringan yang sering dijadikan titik awal dalam evaluasi model teoretis (Wang dkk., 2021). Dengan kata lain, evaluasi ulang di masa kini diperlukan bukan untuk menggantikan model lama, tetapi untuk memastikan bahwa performanya tetap sesuai ketika dibandingkan dengan data modern yang lebih komprehensif.

Penelitian ini secara khusus meninjau nuklida ringan stabil dengan

nomor massa  $A=1$  hingga  $A=55$ . Nuklida stabil didefinisikan sebagai inti atom yang tidak mengalami peluruhan radioaktif dalam rentang waktu observasi manusia. Umumnya, nuklida ini memiliki energi ikat tinggi dan rasio neutron-proton yang mendekati ideal, menjadikannya acuan yang andal dalam validasi model teoretis (Levin, 2004).

Untuk mengukur performa prediktif dari berbagai parameter SEMF, digunakan tiga metrik kuantitatif: selisih langsung antara hasil perhitungan dan data eksperimen, *error* absolut untuk menangkap deviasi tanpa memperhatikan arah selisih terhadap data eksperimen, serta *Mean Absolute Error* (MAE) untuk mengevaluasi akurasi keseluruhan dalam bentuk rata-rata kesalahan absolut. Kombinasi ketiga metrik ini dipilih untuk memberikan gambaran menyeluruh, baik pada tingkat individual nuklida maupun agregat keseluruhan data, serta untuk memastikan evaluasi yang adil terhadap performa masing-masing parameter.

Melalui pendekatan ini, penelitian ini bertujuan memberikan analisis komparatif terhadap akurasi prediksi massa nuklida ringan stabil berdasarkan empat set parameter SEMF, serta memperkuat landasan pemilihan parameter yang optimal dalam studi-studi fisika nuklir selanjutnya.

## METODE PENELITIAN

### *Rumus Semiempirical Mass Formula (SEMF)*

Model massa semiempiris (*Semiempirical Mass Formula*, SEMF) menyatakan bahwa energi ikat nuklida  $B(A,Z)$  dapat didekati sebagai jumlah lima kontribusi utama:

$$B(A, Z) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_{\text{sym}} \frac{(A-2Z)^2}{A} + \delta(A, Z) \quad (1)$$

$$\delta(A, Z) = \begin{cases} +a_p A^{-1/2}, & \text{untuk nuklida genap - genap} \\ 0, & \text{untuk nuklida ganjil - genap} \\ -a_p A^{-1/2}, & \text{untuk nuklida ganjil - ganjil} \end{cases} \quad (2)$$

Keterangan:

$B(A,Z)$  = Energi ikat nuklida

$A$  = Nomor massa

$Z$  = Nomor atom

$a_v$  = Parameter volume

$a_s$  = Parameter permukaan

$\alpha_c$  = Parameter Coulomb  
 $\alpha_{sym}$  = Parameter simetri  
 $\delta(A,Z)$  = Koreksi pasangan (*pairing term*)  
 $\alpha_p$  = Parameter pasangan (*pairing*)  
 (Krane, 1988).

Energi ikat yang telah diperoleh dari persamaan (1) kemudian digunakan untuk memperoleh massa inti  $M_{SEMF}$  dengan menggunakan persamaan berikut:

$$M_{SEMF} = Zm_p + (A - Z)m_n - B(A,Z)/c^2 \quad (3)$$

Keterangan:

$M_{SEMF}$  = Massa inti semiempiris

$m_p$  = Massa proton

$m_n$  = Massa neutron

$c$  = Kecepatan cahaya  
 (Krane, 1988).

Pada penelitian ini, massa nuklida yang telah dihitung dengan rumus SEMF dibandingkan dengan data eksperimen.

### Parameter SEMF Referensi

Pada penelitian ini, digunakan empat set parameter yang berasal dari berbagai sumber literatur dan publikasi yang masing-masing memberikan nilai berbeda untuk kelima parameter utama seperti dapat dilihat pada Tabel 1. Setiap set parameter diberikan kode untuk memudahkan pembahasan selanjutnya.

**Tabel 1. Nilai parameter SEMF referensi**

| Kode | Referensi                | $a_v$<br>(MeV) | $a_s$<br>(MeV) | $a_c$<br>(MeV) | $a_{sym}$<br>(MeV) | $a_p$<br>(MeV) |
|------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|--------------------|----------------|
| I    | (Krane, 1988)            | 15,5000        | 16,8000        | 0,7200         | 23,0000            | 34,0000        |
| II   | (Ankita & Suthar, 2016)  | 15,7500        | 18,0000        | 0,7120         | 23,9000            | -              |
| III  | (Benzaid dkk., 2020)     | 14,9297        | 15,0580        | 0,6615         | 21,6091            | 10,1744        |
| IV   | (Pinedo-Vega dkk., 2016) | 15,5934        | 17,3448        | 0,6935         | 23,6012            | -              |

Pemilihan keempat referensi dilakukan berdasarkan keragaman formulasi parameter SEMF yang tersedia dalam literatur, baik yang menyertakan maupun tidak menyertakan suku *pairing*. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi performa model-model tersebut dalam memprediksi massa inti nuklida ringan stabil secara apa adanya sesuai formulasi aslinya. Meskipun beberapa model tidak mencakup suku *pairing*, hal tersebut tidak menjadi alasan untuk dikeluarkan dari analisis, mengingat pada referensi terpilih telah ditunjukkan bahwa akurasi prediksi tidak semata-mata ditentukan oleh keberadaan suku *pairing*, melainkan juga oleh konsistensi dan kalibrasi parameter lainnya. Dengan demikian, penelitian ini mempertimbangkan seluruh varian parameter sebagai bagian dari studi komparatif yang utuh.

### Rentang Nuklida Tinjauan

Penelitian ini memfokuskan analisis pada nuklida ringan stabil dengan nomor massa  $A=1$  hingga  $A=55$ . Pemilihan rentang ini didasarkan pada beberapa pertimbangan, diantaranya adalah nuklida

cenderung lebih stabil serta belum mengalami efek-efek kompleks seperti *strong nuclear deformation*, *neutron skin effect*, dan *large shell gaps* (Centelles dkk., 2009; El Adri & Oulne, 2021; Hu dkk., 2024). Selain itu, nuklida yang berada pada rentang ini juga lebih cocok untuk pengujian model sederhana seperti SEMF (Krane, 1988).

### Data Eksperimen

Hasil perhitungan massa nuklida dengan rumus SEMF kemudian dibandingkan dengan massa nuklida hasil pengukuran eksperimen. Sumber data yang digunakan adalah *Atomic Mass Evaluation* (AME) versi 2020 (AME2020) dan basis data nuklida *NuBase* yang bersumber dari laman *International Atomic Energy Agency* (IAEA). Data yang digunakan adalah data *mass excess* (ME, selisih antara massa inti sesungguhnya dengan nomor massa  $A$ ). Untuk memperoleh massa inti sesungguhnya dari hasil eksperimen ( $M_{eks}$ ), digunakan persamaan berikut:

$$M_{eks} = ME + A \quad (4)$$

Keterangan:

$M_{eks}$  = Massa nuklida eksperimen

$ME$  = *Mass excess*

$A$  = Nomor massa

(Audi dkk., 2014).

### Metrik Kuantitatif

Untuk mengevaluasi akurasi masing-masing set parameter SEMF, digunakan tiga metrik kuantitatif:

#### Selisih Massa

$$\Delta M_i = M_{SEMF,i} - M_{eks,i} \quad (5)$$

Keterangan:

$\Delta M_i$  = Selisih massa SEMF dan eksperimen

$M_{SEMF,i}$  = Massa perhitungan SEMF nuklida ke- $i$

$M_{eks,i}$  = Massa eksperimen nuklida ke- $i$

#### Error Absolut

$$|\Delta M_i| = |M_{SEMF,i} - M_{eks,i}| \quad (6)$$

Keterangan:

$|\Delta M_i|$  = *Error absolut selisih massa*

#### Mean Absolut Error (MAE)

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |M_{SEMF,i} - M_{eks,i}| \quad (7)$$

Keterangan:

$MAE$  = *Mean absolut error*

$N$  = Total jumlah nuklida

Ketiga metrik ini digunakan secara berurutan untuk menganalisis performa prediktif pada masing-masing nuklida

(selisih dan *error absolut*), serta rata-rata akurasi model secara keseluruhan (MAE) (Munoz dkk., 2025; Pandey dkk., 2024).

### Perangkat Komputasi

Pada penelitian ini, implementasi perhitungan dilakukan dengan menggunakan *Microsoft Excel* (versi *Office 2021*) untuk menghitung energi ikat dan massa nuklida berdasarkan keempat set parameter SEMF. Seluruh operasi aritmetika menggunakan presisi numerik bawaan *Excel*, yaitu *floating-point double precision* dengan kapasitas hingga 15 digit signifikan. Format tampilan angka tidak dibatasi pada jumlah desimal tertentu sehingga perhitungan dilakukan menggunakan nilai numerik penuh tanpa pembulatan manual. Proses analisis dilakukan sepenuhnya menggunakan fungsi bawaan *Excel* tanpa memanfaatkan makro, *script*, atau pemrograman tambahan, sehingga seluruh hasil diperoleh secara konsisten melalui formula *spreadsheet* standar. Pendekatan ini memastikan keseragaman hasil pada perhitungan massa nuklida, selisih massa nuklida, *error absolut* ( $|\Delta M_i|$ ), dan *Mean Absolut Error* (MAE) untuk setiap set parameter.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil Perhitungan SEMF untuk Model I, II, III, dan IV

Hasil perhitungan massa nuklida dengan menggunakan rumus SEMF untuk empat set parameter berbeda serta massa nuklida dari data eksperimental dimuat pada Tabel 2.

**Tabel 2. Nilai massa nuklida stabil dari hasil perhitungan dan data eksperimen dengan urutan data disusun berdasarkan nilai dari nomor massa (A)**

| No. | Nuklida    | A | $M_{SEMF} (u)$ |             |             |             | $M_{eks} (u)$ |
|-----|------------|---|----------------|-------------|-------------|-------------|---------------|
|     |            |   | I              | II          | III         | IV          |               |
| 1   | Hydrogen-1 | 1 | 1,007825032    | 1,007825032 | 1,007825032 | 1,007825032 | 1,007825032   |
| 2   | Hydrogen-2 | 2 | 2,011838207    | 2,013953772 | 2,010657334 | 2,01315745  | 2,014101778   |
| 3   | Helium-3   | 3 | 3,021211983    | 3,024457666 | 3,019558139 | 3,023336616 | 3,016029322   |
| 4   | Helium-4   | 4 | 3,999925129    | 4,015960076 | 4,005922801 | 4,01480977  | 4,002603254   |
| 5   | Litium-6   | 6 | 6,021246416    | 6,015600501 | 6,014645907 | 6,014187973 | 6,015122887   |
| 6   | Litium-7   | 7 | 7,013590081    | 7,017736656 | 7,011735269 | 7,016199932 | 7,016003435   |
| 7   | Berilium-9 | 9 | 9,010082265    | 9,014769937 | 9,008337766 | 9,013050846 | 9,012183062   |

| No. | Nuklida      | A  | $M_{SEMF} (u)$ |             |             |             | $M_{eks} (u)$ |
|-----|--------------|----|----------------|-------------|-------------|-------------|---------------|
|     |              |    | I              | II          | III         | IV          |               |
| 8   | Boron-10     | 10 | 10,01340781    | 10,0119064  | 10,00887681 | 10,01009197 | 10,01293686   |
| 9   | Boron-11     | 11 | 11,00644901    | 11,01159931 | 11,00482946 | 11,00971684 | 11,00930517   |
| 10  | Karbon-12    | 12 | 11,99822804    | 12,00931528 | 11,99931946 | 12,00733334 | 12            |
| 11  | Karbon-13    | 13 | 13,00272708    | 13,00827753 | 13,00124229 | 13,00624515 | 13,00335484   |
| 12  | Nitrogen-14  | 14 | 14,00571243    | 14,00646565 | 14,0022638  | 14,00432948 | 14,003074     |
| 13  | Nitrogen-15  | 15 | 14,99896032    | 15,00485955 | 14,99761569 | 15,00268696 | 15,0001089    |
| 14  | Oksigen-16   | 16 | 15,99276924    | 16,00345683 | 15,99338161 | 16,00117591 | 15,99491462   |
| 15  | Oksigen-17   | 17 | 16,99518678    | 17,00139145 | 16,99398414 | 16,99908565 | 16,99913176   |
| 16  | Oksigen-18   | 18 | 17,99137923    | 18,00194107 | 17,99165151 | 17,99957966 | 17,99915961   |
| 17  | Fluor-19     | 19 | 18,99143729    | 18,99791006 | 18,9903757  | 18,99547609 | 18,99840316   |
| 18  | Neon-20      | 20 | 19,98669871    | 19,99721697 | 19,98711557 | 19,99466508 | 19,99244018   |
| 19  | Neon-21      | 21 | 20,98773648    | 20,99444465 | 20,98681279 | 20,99188606 | 20,99384668   |
| 20  | Neon-22      | 22 | 21,98341387    | 21,99384829 | 21,98371046 | 21,99125718 | 21,99138511   |
| 21  | Natrium-23   | 23 | 22,98410399    | 22,99101855 | 22,98331335 | 22,98833771 | 22,98976928   |
| 22  | Magnesium-24 | 24 | 23,98051765    | 23,99095153 | 23,98086861 | 23,9881427  | 23,98504169   |
| 23  | Magnesium-25 | 25 | 24,9805556     | 24,9876505  | 24,97989176 | 24,98484889 | 24,98583697   |
| 24  | Magnesium-26 | 26 | 25,97584909    | 25,98621283 | 25,97623119 | 25,98339618 | 25,98259297   |
| 25  | Aluminium-27 | 27 | 26,97710405    | 26,98435569 | 26,97655968 | 26,98143405 | 26,98153841   |
| 26  | Silikon-28   | 28 | 27,97449003    | 27,98486539 | 27,97483333 | 27,9818054  | 27,97692653   |
| 27  | Silikon-29   | 29 | 28,97375974    | 28,98114655 | 28,97332658 | 28,978105   | 28,97649466   |
| 28  | Silikon-30   | 30 | 29,96875047    | 29,97905735 | 29,96923746 | 29,97601468 | 29,97377014   |
| 29  | Fosfor-31    | 31 | 30,97053115    | 30,9780333  | 30,97020022 | 30,9748715  | 30,973762     |
| 30  | Sulfur-32    | 32 | 31,96877094    | 31,97908654 | 31,96912665 | 31,97577591 | 31,97207117   |
| 31  | Sulfur-33    | 33 | 32,9674253     | 32,97502444 | 32,96718702 | 32,97174161 | 32,97145891   |
| 32  | Sulfur-34    | 34 | 33,96216733    | 33,97241068 | 33,96275493 | 33,96913817 | 33,96786701   |
| 33  | Klorin-35    | 35 | 34,964448      | 34,97212704 | 34,96429226 | 34,96872206 | 34,9688527    |
| 34  | Sulfur-36    | 36 | 35,96066039    | 35,97103988 | 35,96118776 | 35,96774164 | 35,96708069   |
| 35  | Argon-36     | 36 | 35,96345808    | 35,97369943 | 35,96382387 | 35,97013509 | 35,96754511   |
| 36  | Klorin-37    | 37 | 36,95989508    | 36,96770524 | 36,95991624 | 36,96431577 | 36,96590258   |
| 37  | Argon-38     | 38 | 37,95613544    | 37,96629829 | 37,95680497 | 37,96278976 | 37,9627321    |
| 38  | Kalium-39    | 39 | 38,95889751    | 38,96668946 | 38,95887499 | 38,96303569 | 38,96370649   |
| 39  | Argon-40     | 40 | 39,9534452     | 39,96371649 | 39,95415112 | 39,9602055  | 39,96238312   |
| 40  | Kalsium-40   | 40 | 39,95861597    | 39,96876192 | 39,95897546 | 39,96493826 | 39,96259085   |
| 41  | Kalium-41    | 41 | 40,9534702     | 40,96135852 | 40,95369254 | 40,95773949 | 40,96182526   |
| 42  | Kalsium-42   | 42 | 41,95068045    | 41,9607406  | 41,95140392 | 41,95698809 | 41,95861778   |
| 43  | Kalsium-43   | 43 | 42,95051665    | 42,95842461 | 42,95081937 | 42,95468711 | 42,95876638   |
| 44  | Kalsium-44   | 44 | 43,94699071    | 43,95713466 | 43,94783182 | 43,95339973 | 43,95548152   |
| 45  | Skandium-45  | 45 | 44,94773417    | 44,95564963 | 44,94810383 | 44,95179104 | 44,95590707   |
| 46  | Kalsium-46   | 46 | 45,9469875     | 45,95736234 | 45,9477328  | 45,95359864 | 45,95368774   |
| 47  | Titanium-46  | 46 | 45,94582061    | 45,95575329 | 45,94656379 | 45,95174754 | 45,95262636   |
| 48  | Titanium-47  | 47 | 46,94512187    | 46,95303324 | 46,94554506 | 46,94905083 | 46,95175749   |
| 49  | Titanium-48  | 48 | 47,94127161    | 47,95126613 | 47,94220211 | 47,94729547 | 47,94794068   |
| 50  | Titanium-49  | 49 | 48,9422869     | 48,95039304 | 48,94282377 | 48,94642328 | 48,94786439   |
| 51  | Titanium-50  | 50 | 49,94016709    | 49,95035977 | 49,94108458 | 49,94638074 | 49,94478562   |
| 52  | Kromium-50   | 50 | 49,94156878    | 49,95134812 | 49,94229313 | 49,94707884 | 49,94604221   |
| 53  | Vanadium-51  | 51 | 50,93940258    | 50,94747657 | 50,94001181 | 50,94338888 | 50,94395766   |
| 54  | Kromium-52   | 52 | 51,93627017    | 51,9460917  | 51,93724255 | 51,94187303 | 51,94050471   |
| 55  | Kromium-53   | 53 | 52,93671456    | 52,94474695 | 52,93738088 | 52,94053794 | 52,9406463    |
| 56  | Kromium-54   | 54 | 53,93420309    | 53,94419387 | 53,93523486 | 53,93998489 | 53,93887736   |
| 57  | Mangan-55    | 55 | 54,93421942    | 54,94220105 | 54,93492777 | 54,93786732 | 54,93804304   |

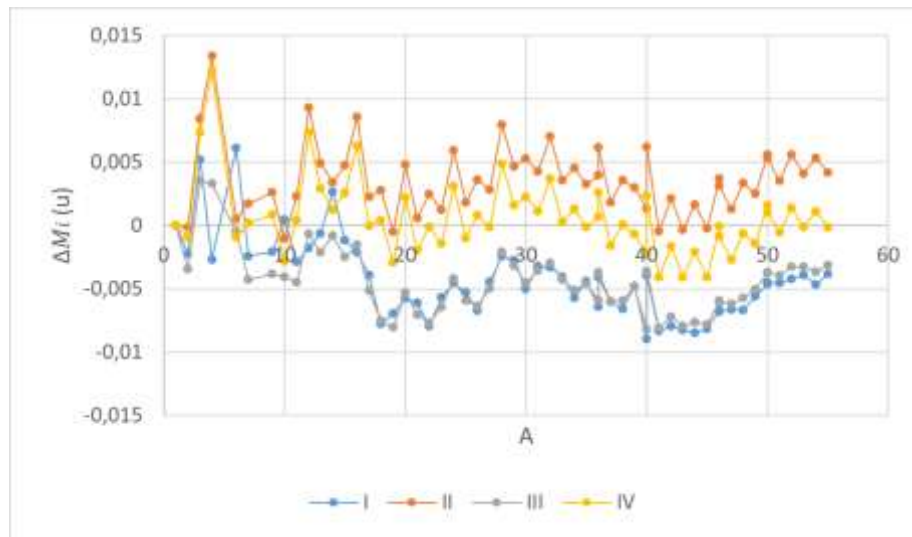
Tabel 2 menunjukkan hasil perhitungan SEMF untuk keempat set parameter referensi (I, II, III, IV) dan juga hasil eksperimental untuk massa nuklida. Secara umum, terdapat perbedaan pada orde  $10^{-1}$  hingga  $10^{-2}$  u, kecuali untuk hidrogen-1 yang menunjukkan nilai yang

sama untuk seluruh hasil perhitungan dan eksperimen. Hal ini disebabkan karena hidrogen-1 hanya memiliki satu proton sebagai nukleon tunggal sehingga tidak memiliki energi ikat inti (Bleam, 2012).

### Hasil Perhitungan Selisih Massa Nuklida ( $\Delta M_i$ )

Selanjutnya, untuk mengetahui detail selisih antara massa nuklida dari hasil perhitungan SEMF dan hasil eksperimen, digunakan persamaan (5). Grafik pada Gambar 1 menunjukkan distribusi selisih massa sebagai fungsi dari nomor massa  $A$  untuk rentang  $A=1$  hingga

$A=55$ . Terdapat empat kurva yang mewakili hasil perhitungan dengan empat set parameter SEMF dari referensi I, II, III, dan IV. Sebagaimana dapat dilihat pada tabel 1, model I dan III mencakup suku *pairing*, sedangkan model II dan IV tidak menyertakan suku *pairing*.



Gambar 1. Grafik selisih massa nuklida dari hasil perhitungan dengan hasil eksperimen

Secara umum, nilai selisih  $\Delta M_i$  berada dalam rentang antara -0,01 u dan 0,015 u yang menunjukkan bahwa keempat model SEMF memiliki kemampuan prediktif yang cukup baik terhadap massa nuklida ringan-stabil. Namun, nampak perbedaan signifikan antar referensi dengan dua kelompok perilaku dominan. Model I (biru) dan model III (abu-abu) umumnya menghasilkan nilai selisih negatif untuk  $A > 15$  (I) dan  $A > 4$  (III). Kedua model ini secara umum menghasilkan nilai selisih negatif yang berarti bahwa hasil perhitungan SEMF cenderung lebih kecil dari massa eksperimen. Hal ini mengindikasikan bahwa kedua model cenderung melebihi estimasi energi ikat. Sebaliknya, model II (oranye) dan model IV (kuning) secara umum menunjukkan selisih positif, menandakan bahwa model menghasilkan nilai energi ikat yang lebih rendah sehingga massa hasil perhitungan lebih besar dari data eksperimen.

Ditinjau dari segi fluktuasi nilai dan karakteristik lokal, model I memiliki nilai

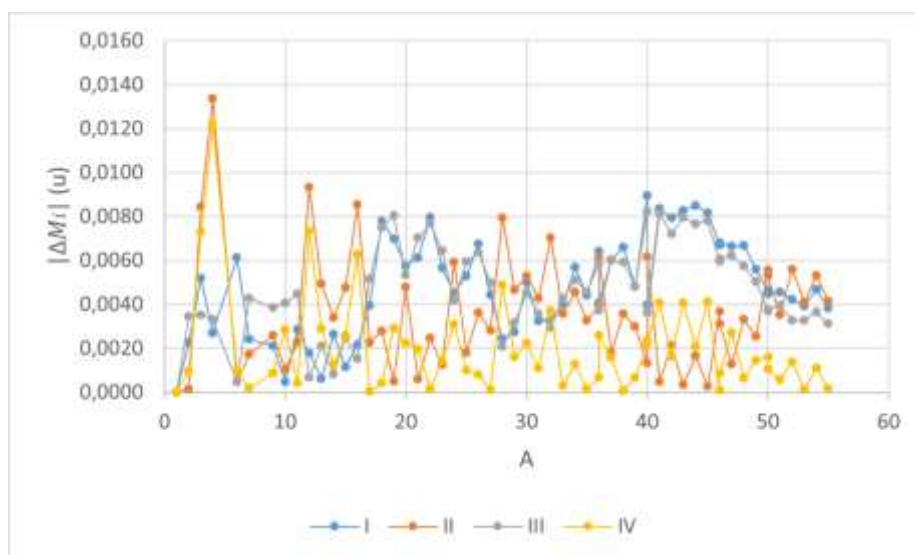
fluktuatif dengan selisih positif dan negatif di rentang  $A=1$  hingga  $A=15$ , namun secara konsisten menjadi negatif untuk  $A > 15$ . Hal ini menandakan bahwa pada nuklida yang sangat ringan terdapat interaksi parameter yang belum stabil tetapi mulai menunjukkan pola sistematis pada  $A$  lebih besar. Model III juga menunjukkan karakteristik serupa dengan transisi cepat ke selisih negatif dari  $A=6$ , dan hanya dua titik ( $A=3$  dan  $A=4$ ) yang menghasilkan  $\Delta M_i$  positif. Kedua model ini memiliki bentuk kurva yang cukup mirip, menunjukkan bahwa struktur parameter dan kehadiran suku *pairing* menghasilkan kecenderungan sistematis. Untuk model II, fluktuasi relatif besar namun mayoritas data berada di daerah positif, kecuali beberapa titik yang sangat dekat nol. Ini mengindikasikan bahwa meskipun ada penyimpangan besar, arah dominan tetap ke atas (massa teoretis lebih tinggi dari eksperimen). Model IV memiliki penyebaran selisih yang relatif seimbang antara positif dan negatif, tetapi masih

menunjukkan fluktuasi yang cukup tajam. Ini menunjukkan kurangnya koreksi stabilisasi akibat tidak adanya suku *pairing*, serta kemungkinan bahwa parameter lain dalam model kurang sesuai untuk rentang A ini.

### Hasil Perhitungan Error Absolut ( $|\Delta M_i|$ )

Setelah menganalisis selisih massa antara hasil perhitungan model SEMF dan data eksperimen, langkah berikutnya yang penting adalah mengevaluasi nilai *error* absolut. Tidak seperti selisih yang

mempertahankan informasi arah (positif atau negatif), *error* absolut mengabaikan tanda dan hanya mencerminkan besar prediksi kesalahan secara keseluruhan, sehingga lebih tepat digunakan untuk menilai ketepatan (*accuracy*) dari suatu model terhadap data acuan (Munoz dkk., 2025). Dengan demikian, *error* absolut membantu mengidentifikasi model mana yang secara konsisten menghasilkan estimasi yang paling mendekati nilai eksperimen, tanpa terpengaruh oleh fluktuasi arah selisih.



Gambar 2. Grafik *error* absolut hasil perhitungan terhadap hasil eksperimen

Grafik yang ditampilkan pada Gambar 2 menunjukkan distribusi *error* absolut  $|\Delta M_i|$  dalam satuan massa atom (u) terhadap nomor massa A untuk keempat model yang diuji. Secara umum, model IV (kuning) menunjukkan performa terbaik dengan nilai *error* absolut terkecil dan paling stabil sepanjang rentang  $1 \leq A \leq 55$ . Mayoritas titik *error* berada di bawah 0,004 u dengan fluktuasi yang relatif sempit. Hal ini menandakan bahwa model IV mampu menghasilkan estimasi massa yang paling dekat dengan data eksperimen, meskipun tidak menggunakan suku *pairing* dalam formulanya. Model II (merah) juga menunjukkan performa yang baik, meskipun nilai *error* absolutnya sedikit lebih besar dan lebih fluktuatif dibandingkan model IV. Sebagian besar titik berada di bawah 0,006 u dan hanya

beberapa yang menunjukkan *error* lebih tinggi. Meskipun demikian, pola keseluruhannya tetap menunjukkan tingkat akurasi yang cukup baik, menempatkan model ini sebagai model dengan kinerja kedua terbaik dalam estimasi massa nuklida ringan.

Sebaliknya, model I (biru) dan model III (abu-abu) yang keduanya menyertakan suku *pairing* memperlihatkan *error* absolut yang cenderung lebih besar dan lebih berfluktuasi, terutama setelah  $A > 15$ . Model I secara khusus memiliki *error* absolut tertinggi di beberapa titik pada rentang  $35 < A < 50$ , sementara model III menunjukkan fluktuasi yang agak lebih terkendali, tetapi tetap lebih tinggi dari Model II dan IV. Perbedaan performa ini mengindikasikan bahwa penyertaan suku



*pairing* tidak otomatis menghasilkan estimasi yang lebih baik, terutama jika koefisiennya tidak sesuai dengan karakteristik nuklida ringan. Bahkan, jika tidak dikalibrasi dengan tepat, suku *pairing* dapat menyebabkan model mengabaikan efek dominan lain seperti efek volume atau simetri, sehingga memperbesar kesalahan (Hein dkk., 2022; Kirson, 2008).

Temuan ini menarik karena secara teori, suku *pairing* memainkan peran penting dalam struktur inti, khususnya dalam kestabilan inti dengan jumlah proton dan neutron genap. Namun, dalam konteks massa total nuklida ringan, hasil menunjukkan bahwa efek *pairing* belum cukup dominan untuk meningkatkan akurasi model, atau bahwa bentuk dan parameter suku *pairing* dalam Model I dan III tidak sesuai untuk rentang A kecil (Gjorgievska dkk., 2024; Gora dkk., 2022). Sementara itu, Model II dan IV, yang lebih sederhana tanpa suku *pairing*, justru menunjukkan ketepatan prediksi yang lebih baik.

### **Hasil Perhitungan Mean Absolut Error (MAE)**

Setelah meninjau grafik selisih dan *error* absolut sebagai bentuk visual dari perbedaan antara hasil perhitungan dan data eksperimen, analisis dilanjutkan dengan perhitungan nilai *Mean Absolute Error* (MAE). MAE merupakan salah satu metrik kuantitatif yang paling umum digunakan untuk mengukur rata-rata besar kesalahan antara hasil perhitungan dan data acuan, tanpa memperhatikan arah selisih (Amrani & Akkoyun, 2025; Munoz dkk., 2025). Perumusan MAE dituliskan di persamaan (7). Nilai MAE yang lebih kecil mengindikasikan bahwa model memberikan hasil perhitungan yang secara keseluruhan lebih dekat terhadap data eksperimen. Berdasarkan perhitungan terhadap nuklida ringan stabil ( $1 \leq A \leq 55$ ), diperoleh hasil seperti pada Tabel 3.

**Tabel 3. Hasil perhitungan MAE untuk model I, II, III, dan IV**

| Model | MAE (u) |
|-------|---------|
| I     | 0.00479 |
| II    | 0.00366 |
| III   | 0.00464 |
| IV    | 0.00199 |

Dari hasil perhitungan MAE yang disajikan pada Tabel 3, Model IV menunjukkan nilai MAE terkecil yaitu 0,00199 u, mengukuhkannya sebagai model dengan akurasi tertinggi dalam studi ini. Disusul oleh Model II dengan MAE sebesar 0,00366 u, kemudian Model III (0,00464 u) dan Model I (0,00479 u) sebagai yang terbesar.

Hasil ini konsisten dengan pola yang telah diamati pada grafik *error* absolut sebelumnya, di mana Model IV menunjukkan fluktuasi terkecil dan distribusi *error* yang paling rapat terhadap nol. Hal ini memperkuat kesimpulan bahwa Model IV paling sesuai dalam memprediksi massa nuklida ringan stabil meskipun tidak menggunakan suku *pairing*.

Sebaliknya, Model I dan III yang menyertakan suku *pairing* justru menghasilkan nilai MAE yang lebih besar. Ini menunjukkan bahwa keberadaan suku *pairing* tidak selalu meningkatkan akurasi prediksi apabila nilai parameternya tidak terkalibrasi secara optimal untuk rentang nuklida yang ditinjau (Hein dkk., 2022; Kirson, 2008). Dalam hal ini, kompleksitas tambahan tidak berbanding lurus dengan peningkatan kinerja. Hasil ini mendukung pernyataan bahwa pemilihan parameter model lebih menentukan daripada banyaknya suku dalam rumus, terutama pada nuklida dengan struktur sederhana dan efek *pairing* yang belum terlalu dominan.

### **SIMPULAN**

Penelitian ini membandingkan akurasi empat model Formula Massa Semi-Empiris (SEMF) dengan parameter berbeda, dua di antaranya menyertakan suku *pairing* (Model I dan III), dan dua lainnya tidak (Model II dan IV). Perhitungan massa inti, selisih terhadap



data eksperimen, *error* absolut, dan *Mean Absolute Error* (MAE) dilakukan pada nuklida ringan stabil. Hasil menunjukkan bahwa Model I dan III cenderung menghasilkan massa lebih kecil dari eksperimen (selisih negatif), sementara Model II dan IV memiliki fluktuasi selisih yang lebih seimbang dan banyak mendekati nol. Dari grafik *error* absolut, Model IV menghasilkan nilai terkecil dan paling konsisten. Nilai *Mean Absolute Error* (MAE) mendukung temuan ini, dengan Model IV memberikan akurasi tertinggi (MAE = 0,00199 u), disusul Model II, III, dan I. Menariknya, model tanpa suku *pairing* justru menunjukkan performa lebih baik, mengindikasikan bahwa pemilihan parameter memiliki pengaruh yang lebih dominan daripada jumlah suku dalam rumus, khususnya pada nuklida ringan dengan struktur sederhana dan efek *pairing* yang belum terlalu menonjol. Temuan ini memberikan implikasi bahwa pembaruan atau reevaluasi parameter SEMF tetap relevan untuk memastikan ketepatan model dalam era data massa berpresisi tinggi. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan memperluas analisis pada rentang nomor massa yang lebih besar, menguji model terhadap nuklida tidak stabil, serta mengevaluasi performa parameter SEMF menggunakan metrik tambahan seperti *Root Mean Square Error* (RMSE) atau analisis statistik lainnya.

## REFERENSI

- Amrani, N., & Akkoyun, S. (2025). Determination of (p, n) reaction cross-section for various nuclei at 7.5 MeV by using machine learning models. *Applied Radiation and Isotopes*, 225, 112059. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2025.112059>
- Ankita, & Suthar, B. (2016). *Nuclear binding energy using semi empirical mass formula*. 020024. <https://doi.org/10.1063/1.4946074>
- Audi, G., Wang, M., Wapstra, A. H., Kondev, F. G., MacCormick, M., & Xu, X. (2014). The 2012 Atomic Mass Evaluation and the Mass Tables. *Nuclear Data Sheets*, 120, 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.nds.2014.06.126>
- Benzaid, D., Bentriddi, S., Kerraci, A., & Amrani, N. (2020). Bethe–Weizsäcker semiempirical mass formula coefficients 2019 update based on AME2016. *Nuclear Science and Techniques*, 31(1), 9. <https://doi.org/10.1007/s41365-019-0718-8>
- Bleam, W. F. (2012). Elements. In *Soil and Environmental Chemistry* (pp. 1–39). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415797-2.00001-7>
- Centelles, M., Roca-Maza, X., Viñas, X., & Warda, M. (2009). Nuclear Symmetry Energy Probed by Neutron Skin Thickness of Nuclei. *Physical Review Letters*, 102(12), 122502. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.102.122502>
- El Adri, M., & Oulne, M. (2021). Tensor force effect on the neutron shell closure in super-heavy elements. *The European Physical Journal Plus*, 136(3), 343. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01328-9>
- Gjorgievska, S., Kochankovski, H., Stankovic, K., & Barandovski, L. (2024). Revision of the semi-empirical mass formula coefficients by using the ame2020 database. *Nuclear Engineering and Design*, 426, 113403. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113403>
- Gora, S., Soni, S. K., & Sastri, O. S. K. S. (2022). Activities Based on Empirical Data to Determine Coefficients in Semi-Empirical Mass Formula. *Journal of Research: THE BEDE ATHENAEUM*, 13(1), 71–83. <https://doi.org/10.5958/0976-1748.2022.00007.8>
- Guo, L., Wu, X., & Zhao, P. (2022). Nuclear Mass Predictions of the Relativistic Density Functional Theory with the Kernel Ridge Regression and the Application to r-Process Simulations.

- Symmetry*, 14(6), 1078.  
<https://doi.org/10.3390/sym14061078>
- Hein, M., Pusch, A., & Heusler, S. (2022). Modeling in nuclear physics: a visual approach to the limitations of the semi-empirical mass formula. *European Journal of Physics*, 43(3), 035801. <https://doi.org/10.1088/1361-6404/ac4d7c>
- Hu, B. S., Sun, Z. H., Hagen, G., & Papenbrock, T. (2024). Ab initio computations of strongly deformed nuclei near 80Zr. *Physical Review C*, 110(1), L011302. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.110.L011302>
- Kasuya, H., & Yoshida, K. (2021). Hartree–Fock–Bogoliubov theory for odd-mass nuclei with a time-odd constraint and application to deformed halo nuclei. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2021(1). <https://doi.org/10.1093/ptep/ptaa163>
- Kirson, M. W. (2008). Mutual influence of terms in a semi-empirical mass formula. *Nuclear Physics A*, 798(1–2), 29–60. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2007.10.011>
- Krane, K. S. (1988). *Introductory Nuclear Physics*. John Wiley & Sons.
- Levin, C. (2004). Basic Physics of Radionuclide Imaging. In *Emission Tomography* (pp. 53–88). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0127444482-6.50007-7>
- Munoz, J. M., Udrescu, S. M., & Garcia Ruiz, R. F. (2025). Discovering nuclear models from symbolic machine learning. *Communications Physics*, 8(1), 101. <https://doi.org/10.1038/s42005-025-02023-2>
- Pandey, B., Giri, S., Pant, R. D., Jalan, M., Chaudhary, A., & Adhikari, N. P. (2024). Prediction of binding energy using machine learning approach. *AIP Advances*, 14(10). <https://doi.org/10.1063/5.0230425>
- Pinedo-Vega, J., Ríos-Martínez, C., Talamantes-Carlos, M., Mireles-García, F., Dávila-Rangel, J., & Badillo-Almaraz, V. (2016). Semi-empirical Nuclear Mass Formula: Simultaneous Determination of 4 Coefficients. *Asian Journal of Physical and Chemical Sciences*, 1(2), 1–10. <https://doi.org/10.9734/AJOPACS/2016/31266>
- Wang, M., Huang, W. J., Kondev, F. G., Audi, G., & Naimi, S. (2021). The AME 2020 atomic mass evaluation (II). Tables, graphs and references\*. *Chinese Physics C*, 45(3), 030003. <https://doi.org/10.1088/1674-1137/abddaf>
- Yiu, T. C., Liang, H., & Lee, J. (2024). Nuclear mass predictions based on a deep neural network and finite-range droplet model (2012)\*. *Chinese Physics C*, 48(2), 024102. <https://doi.org/10.1088/1674-1137/ad021c>
- Yüksel, E., Soydaner, D., & Bahtiyar, H. (2024). Nuclear mass predictions using machine learning models. *Physical Review C*, 109(6), 064322. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.109.064322>