PROTON DRIPLINE PADA ISOTON N = 28 DALAM MODEL RELATIVISTIC MEAN FIELD (RMF)

J. P. Diningrum^{*)}, A. M. Nugraha, N. Liliani, A. Sulaksono

Departemen Fisika Murni dan Terapan, FMIPA, Universitas Indonesia, Depok 16424

*) Email: jennyprimanita@gmail.com

Abstrak

Posisi dua dan satu proton dripline dipelajari dengan menggunakan model *Relativistic Mean Field* (RMF) termodifikasi. Kami menggunakan tujuh buah parameter set dari model RMF untuk mempelajari pengaruh kopling isovektor-isoskalar, tensor dan *electromagnetic exchange* terhadap prediksi proton dripline. Untuk menentukan posisi satu dan dua proton dripline pada isoton N = 28 dilakukan dengan menggunakan metode energi separasi dan energi partikel tunggal. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa prediksi dua proton dripline dari isoton N = 28 dengan menggunakan energi separasi berada pada Z = 30 untuk parameter set 0.04+T-E dan 0.055+T-E, serta pada Z = 32 untuk kelima parameter set yang lain dan eksperimen. Sedangkan, dari analisa energi partikel tunggal dan energi Fermi proton, proton dripline diprediksi berada pada Z = 30. Prediksi menggunakan metode energi separasi satu proton pada inti ganjil menunjukan dripline pada Z = 29 untuk parameter set 0.04+T-E dan 0.055+T-E, serta Z = 31 untuk kelima parameter set 0.04+T-E dan 0.055+T-E, serta ze 31 untuk kelima parameter set 0.04+T-E dan 0.055+T-E, serta Z = 31 untuk kelima parameter set 0.04+T-E dan 0.055+T-E, serta Z = 31 untuk kelima parameter set 0.04+T-E dan 0.055+T-E, serta Z = 31 untuk kelima parameter set yang lain dan eksperimen. Sedangkan, berdasarkan analisa energi partikel tunggal dan energi Fermi proton, satu proton dripline berada pada Z = 31. Kami juga mendapatkan bahwa kopling isovektor-isoskalar, tensor dan *electromagnetic exchange* tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap prediksi posisi dari satu dan dua proton dripline. Kami juga mengamati bahwa satu dan dua proton dripline tidak memiliki korelasi terhadap sifat bulk inti, seperti skin, energi ikat, dan sebagainya.

Abstract

One and two proton driplines are studied within modified Relativistic Mean Field (RMF) model. We use seven RMF parameter sets to study the effects of coupling isovector-isoscalar, tensors, and electromagnetic exchange on prediction of proton driplines. To determine the position of one and two proton driplines of the chain of N = 28 isotones, we use separation energies and single particle energy methods. Our calculation results have shown that prediction two proton dripline of N = 28 isotones using separation energy lies at Z = 30 for 0.04+T-E and 0.055+T-E parameter sets and it lies at Z = 32 for the one of other used parameter sets and the one from experiment. While based on single particle energy and the proton Fermi energy analysis, the proton dripline lies at Z = 30. We also obtain by using one proton separation energy, the dripline lies at Z = 29 for 0.04+T-E and 0.055+T-E parameter sets and for the one of other used parameter sets and the one from experiment. While based on single particle energy and the proton Fermi energy analysis, the proton dripline lies at Z = 30. We also obtain by using one proton separation energy, the dripline lies at Z = 29 for 0.04+T-E and 0.055+T-E parameter sets and for the one of other used parameter sets and one from experiment lies at Z = 31. While based on the single particle energy and proton Fermi energy analysis, it lies at Z = 31. We obtain that coupling isovector-isoscalar, tensors, and electromagnetic exchange couplings do not provide a significant effects on the prediction proton driplines. We also observe that one and two proton driplines do not have a strong correlation with bulk properties nuclei, such as skin, binding energy, and so on.

Keywords: Relativistic Mean Field (RMF) model, proton driplines, separation energy, single particle energy.

1. Pendahuluan

Penjelasan tentang inti diluar garis kestabilan merupakan salah satu tantangan yang menarik dalam bidang teori struktur nuklir[1]. Tidak seperti tingkah laku inti dekat garis kestabilan, pada inti diluar garis kestabilan masih terdapat fenomena yang tidak diketahui seperti proton dan neutron dripline serta daerah massa inti super berat (superheavy). Maka, dalam penelitian ini akan dilakukan observasi lebih jauh mengenai daerah proton dan neutron dripline.

Dripline merupakan daerah diluar garis kestabilan yang memiliki rasio proton terhadap neutron sekitar 2.0-2.5[2]. Inti yang dekat dengan proton dripline memiliki distribusi proton yang tidak seragam dan energi ikat yang lemah. Selain itu, kerapatan permukaan inti menjadi rendah. Pada daerah proton dripline pengaruh gaya tolak Coulomb semakin kuat ketika jumlah proton semakin besar. Oleh karena itu, pada inti yang berat efek *pairing* pada inti dripline sangat diperhitungkan.

Sifat inti dripline dapat digambarkan menggunakan model Hartree Fock Bogoliubov (HFB) dan model *Relativistic Mean Field* (RMF). Model HFB merupakan perluasan dari model Hartree-Fock (pendekatan partikel tunggal) ditambah koreksi pairing[3]. Model RMF dapat bersaing dengan model non-relativistik, seperti model Skyrme atau Gogny yang sukses dalam menggambarkan struktur nuklir dan dinamik pada energi rendah. Berbeda dengan pendekatan Hartree-Fock, model RMF menganggap dengan menggunakan derajat kebebasan meson secara fisis lebih baik dibandingkan pendekatan gaya efektif pada model Skyrme dan Gogny. Selain itu, RMF telah terbukti sangat penting untuk mempelajari inti yang tidak stabil dekat dripline karena RMF memberikan interaksi spin-orbit yang cukup baik untuk seluruh daerah massa inti[4]. Sehingga, model RMF cukup dapat diandalkan untuk menyelidiki dripline, seperti juga dengan model HFB.

Daerah proton dripline yang digunakan dalam penelitian ini adalah isoton N = 28. Dengan model RMF termodifikasi kita dapat memprediksi posisi satu dan dua proton dripline serta menganalisis pengaruh suku-suku didalamnya terhadap prediksi satu dan dua proton dripline. Selain itu, adanya tensor, kopling isovektor-isoskalar, dan *electromagnetic exchange* terhadap sifat *bulk* inti, seperti energi ikat, jari-jari rms, jari-jari difraksi, ketebalan permukaan dan skin, juga dapat kita analisis korelasinya.

2. Metode Penelitian

Model RMF termodifikasi memprediksi energi simetri yang lebih rendah dan sesuai dengan hasil eksperimen dibandingkan dengan RMF standar seperti NL3. Energi simetri dikatakan baik dan sesuai dengan hasil eksperimen, jika memiliki nilai sekitar 25-35MeV[5]. Energi simetri mempunyai peranan yang penting untuk mengklasifikasikan apakah suatu parameter set dapat dikatakan baik atau tidak.

Medan meson yang berinteraksi pada model RMF termodifikasi terdiri dari empat meson, yaitu meson σ (meson skalar isoskalar dan bersifat atraktif), meson δ (meson skalar isovektor), meson ω (meson vektor isoskalar dan bersifat repulsif), dan meson p (meson vektor isovektordan bergantung pada efek isospin dari inti atom). Meson δ dan meson ρ memiliki peran penting dalam energi simetri, yaitu energi yang dapat mengubah proton menjadi neutron. Selain meson, medan medan foton juga diperhitungkan dengan baik oleh model RMF. Medan foton memiliki peran dalam interaksi Coulomb dimana isospin bergantung pada gaya nuklir yang digambarkan oleh meson vektor isovektor, p.

Model RMF termodifikasi merupakan RMF standar dengan penambahan suku interaksi *selfcoupling* meson ω , interaksi *cross-coupling* meson ω dengan meson ρ , tensor meson ω dan ρ , serta suku *electromagnetic exchange*. Penambahan suku-suku ini yang membuat energi simetri untuk model RMF termodifikasi menjadi lebih baik.

Untuk mempelajari lebih lanjut mengenai inti dripline, kita dapat menghitung persamaan gerak dan persamaan energi dengan menggunakan model RMF termodifikasi. Persamaan gerak direpresentasikan melalui kerapatan Lagrangian dan persamaan energi melalui kerapatan Hamiltonian. Persamaan kerapatan Lagrangian dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\mathcal{L}_{RMF} = \mathcal{L}_N + \mathcal{L}_M + \mathcal{L}_{Lin} + \mathcal{L}_N + \mathcal{L}_T + \mathcal{L}_{\mu\omega}^4 + \mathcal{L}_{esc}^{EM}.$$
(1)
Maka, persamaan Lagrangian dapat dituliskan secara lengkap sebagai berikut:

$$\begin{split} \mathcal{L}_{RMF} &= \sum_{j=1}^{N} \overline{\psi_{j}} \left[i \gamma^{\mu} \partial_{\mu} - (M - g_{\sigma} \phi) - \left(g_{\omega} \gamma^{\mu} V_{\mu} + \frac{1}{2} g_{\rho} \gamma^{\mu} \tau R_{\mu} \right) \right] \psi_{j} + \frac{1}{2} \left(\partial_{\mu} \phi \partial^{\mu} \phi - m_{\sigma}^{2} \phi^{2} \right) \\ &- \frac{k_{3}}{6M} g_{\sigma} m_{\sigma}^{2} \phi^{3} - \frac{k_{4}}{24M^{2}} g_{\sigma}^{2} m_{\tau}^{2} \phi^{4} + \frac{1}{2} \left(\partial_{\mu} d\partial^{\mu} d - m_{\delta}^{2} d^{2} \right) + \sum_{j=1}^{A} g_{\sigma} d \overline{\psi_{j}} \tau \psi_{j} \\ &- \frac{1}{4} V_{\mu\nu} V^{\mu\nu} + \frac{1}{2} m_{\omega}^{2} V_{\mu} V^{\mu} - \frac{1}{4} R_{\mu\nu} R^{\mu\nu} + \frac{1}{2} m_{\rho}^{2} R_{\mu} R^{\mu} \\ &+ \sum_{j=1}^{A} \left(-\frac{f_{\omega}}{2M} \partial^{\nu} V^{\mu} \overline{\psi_{j}} i \gamma_{\mu} \gamma_{\nu} \psi_{j} - \frac{f_{\rho}}{4M} \partial^{\nu} R^{\mu} \overline{\psi_{j}} \tau i \gamma_{\mu} \gamma_{\nu} \psi_{j} \right) - \frac{1}{2} \partial^{\nu} A^{\mu} \partial_{\nu} A_{\mu} \\ &- \sum_{j=1}^{A} e A^{\mu} \overline{\psi_{j}} \frac{1 + \tau_{0}}{2} \gamma_{\mu} \psi_{j} + \frac{1}{24} \xi_{0} g_{\omega}^{2} \left(V_{\mu} V^{\mu} \right)^{2} + \frac{\eta_{2\rho}}{4M^{2}} g_{\omega}^{2} m_{\rho}^{2} V_{\mu} V^{\mu} R_{\mu} R^{\mu} \\ &+ C_{EXC}^{2M} \left[\frac{3}{4} e^{2} \left(\frac{3}{\pi} \right)^{\frac{1}{9}} \right] \rho_{p}^{\frac{4}{9}} \left[1 - \frac{1}{3M^{2}} (3\pi^{2})^{\frac{2}{9}} \rho_{p}^{\frac{2}{9}} \right]. \end{split}$$

Dengan M adalah massa nukleon; m_{σ} , m_{δ} , m_{ω} , m_{ρ} masing-masing adalah massa meson skalar isoskalar (σ), massa meson skalar isovektor (δ), massa meson vektor isoskalar (ω), dan massa meson vektor isovektor (ρ); ϕ , V^{μ}, R^{μ} masing-masing adalah harga ekspektasi untuk medan meson skalar isoskalar (σ), meson vektor isoskalar (ω), dan meson vektor isovektor (ρ); A^{μ} adalah medan photon; g_{σ} , g_{δ} , g_{ω} , g_{ρ} masing-masing adalah konstanta kopling medan meson skalar isoskalar (σ), meson skalar isovektor (δ), meson vektor isoskalar (ω), dan meson vektor isovektor (ρ); f_{ω} , f_{ρ} menyatakan tensor kopling untuk meson ω dan meson ρ .

Model RMF termodifikasi terdiri dari tujuh buah variasi parameter set. Perbedaan variasi parameter set ini dilakukan untuk melihat pengaruh dari kopling isovektor-isoskalar, tensor, dan *electromagnetic exchange* terhadap hasil prediksi proton dripline. Ketujuh variasi parameter set tersebut dapat dilihat pada Tabel 1. **Tabel 1.** Ketujuh variasi parameter set dalam model RMF termodifikasi

Parameter Set	Tensor	Kopling Isovektor- Isoskalar	Electro- magnetic Exchange
0.0-T-E	-	0.0	0
0.0+T-E	\checkmark	0.0	0
0.04+T-E	\checkmark	0.04	0
0.055+T-E		0.05	0
0.0+T+E		0.0	1
0.04+T+E		0.04	1
0.06+T+E		0.06	1

Tensor isoskalar dan isovektor (f_{ω} dan f_{ρ}) memiliki peran dalam sifat *bulk* inti pada *finite nuclei* dan spektrum partikel tunggal. Di satu sisi, kontribusi tensor yang besar dibutuhkan untuk memperbaiki prediksi spektrum partikel tunggal. Akan tetapi di sisi lain, nilai konstanta tensor yang tidak terlalu besar di tuntut untuk memperbaiki sifat *bulk* dari *finite nuclei*.

Interaksi *cross-coupling* meson ω dan meson ρ $(\eta_{z_{\ell}})$ memungkinkan untuk merubah kebergantungan kerapatan pada koefisien energi simetri dan ketebalan skin neutron pada inti berat tanpa mempengaruhi sifat dari *finite nuclei*. Pada suku *electromagnetic exchange* digunakan bentuk *Local Density Approximation* (LDA)[6]. Efek yang akan hilang dengan adanya pendekatan LDA diasumsikan akan diserap secara efektif oleh parameter bebas \mathcal{C}_{em}^{20} [7].

3. Hasil dan Pembahasan

Untuk mengetahui prediksi proton dripline pada isoton N = 28, kami menggunakan jumlah proton Z = 20-40 untuk inti genap dan jumlah proton Z = 21-39 untuk inti ganjil.



Gambar 1. (Atas) Energi separasi dua proton S_{2p} untuk isoton N = 28 dengan variasi parameter set model RMF

dan hasil eksperimen. (Bawah) Persentase antara S_{2p} hasil perhitungan dengan model RMF dan S_{2p} hasil eksperimen.

Prediksi dua proton dripline dapat dilakukan salah satunya dengan cara melihat energi separasi dua proton yang mendekati nol. Energi separasi dua proton merupakan energi yang dibutuhkan untuk melepaskan dua proton pada kulit terluar. Energi separasi dua proton dapat dihitung dari perbedaan antara energi ikat dua inti yang berdekatan, dengan persamaan:

$$\hat{S}_{2v} = E_B(Z, N) - E_B(Z - 2, N).$$
 (3)

Ketika inti memiliki energi separasi mendekati nol, maka pada titik tersebut dapat dikatakan ikatan nuklir berakhir dan inti menjadi dripline.

Pada Gambar 1 (atas) terlihat bahwa parameter set 0.04+T-E dan 0.055+T-E memprediksi proton dripline pada Z = 30. Sedangkan kelima parameter set yang lain dan juga hasil eksperimen memprediksi proton dripline pada Z = 32. Pada Gambar 1 (bawah), disajikan persentase energi separasi dua proton hasil perhitungan dengan model RMF terhadap hasil eksperimen (AME2003)[8]. Perbedaan paling besar terletak pada Z = 30 untuk parameter set 0.04+T-E dan 0.055+T-E sekitar 3.5 MeV. Hal ini menunjukkan bahwa semakin kecil nilai $\eta_{2\rho}$ dan adanya C_{exc}^{EM} membuat kesalahan relatif semakin kecil.

Energi separasi dua proton juga dapat memprediksi adanya inti *magic number*. Hal ini ditandai dengan penurunan nilai S_{2p} secara signifikan, sehingga Z = 28 diindikasi sebagai *magic number*. Hasil ini sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Saxena yang menyatakan bahwa kulit tertutup pada proton telah dinyatakan oleh hasil perhitungan untuk Z = 28 pada isoton N = 28 dan membuat inti ⁵⁶Ni menjadi *double magic number*[4].

Cara untuk memprediksi proton dripline selain menggunakan energi separasi dua proton, yaitu dengan mengamati energi partikel tunggal. Memprediksi dua proton dripline menggunakan energi partikel tunggal dapat dilakukan dengan melihat level energi yang mendekati nol dan kenaikan *ocuupancy* yang signifikan. Selain itu, prediksi dua proton dripline juga dapat dilihat ketika energi Fermi proton yang mendekati nol ($\epsilon_{\rm f} \sim 0$).

Pada Gambar 2 (atas), disajikan energi partikel tunggal proton dengan menggunakan salah satu variasi parameter set model RMF, yaitu parameter set 0.04+T+E. Pemilihan salah satu parameter set ini dikarenakan hampir sebagian besar variasi parameter set menunjukkan hasil yang sama. Semua variasi parameter set memprediksi dua proton dripline pada Z=30, kecuali parameter set 0.0+T+E yang memprediksi dua proton dripline pada Z = 32.

Energi Fermi proton (digambarkan dengan bulatan berwana biru) pada Gambar 2 (atas), memiliki nilai mendekati nol dengan energi sebesar -0.2664 MeV pada Z = 30 serta mencapai 0.4112 MeV pada Z = 32. Kemudian pada Gambar 2 (bawah) terjadi kenaikan *occupancy* pada Z = 30 untuk level 2p_{3/2} dan memiliki energi partikel tunggal sebesar 0.0624 MeV. Maka, dapat dikatakan bahwa Z = 30 merupakan prediksi dua proton dripline pada rantai isoton N = 28. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Saxena[4].



Gambar 2. (Atas) Energi partikel tunggal proton dengan model RMF untuk parameter set 0.04+T+E pada isoton N = 28 (inti genap). (Bawah) Energi partikel tunggal proton dan occupancy (jumlah partikel yang menduduki level tertentu) untuk level $1f_{5/2}$ dan $2p_{3/2}$ yang merupakan level dalam keadaan resonan.

Pada Gambar 2 (atas), pada Z = 28 terdapat gap yang cukup besar sekitar 7.5 MeV antara level 1f_{7/2} dan 2p_{3/2} yang mengindikasikan adanya struktur kulit proton terutup. Diantara kedua level tersebut juga terdapat energi Fermi proton, dimana ini menunjukkan bahwa Z = 28 diindikasi sebagai *magic number*. Hal ini sesuai dengan prediksi hasil energi separasi dua proton.

Analogi dengan energi separasi dua proton, energi separasi satu proton dapat ditentukan dengan persamaan:

$$S_p = E_B(Z, N) - E_B(Z - 1, N)$$
 (4)

Pada Gambar 3 (atas) terlihat bahwa parameter set 0.04+T-E dan 0.055+T-E memiliki nilai S_p mendekati nol dengan nilai masing-masing -0.180 MeV dan - 0.379 MeV pada Z = 29. Sedangkan, kelima parameter set lain dan hasil eksperimen (data AME2003)[7] memprediksi satu proton dripline berada pada Z = 31.

Persentase hasil perhitungan dengan model RMF terhadap hasil eksperimen pada Gambar 3 (bawah) memperlihatkan persentase paling besar terjadi pada parameter set 0.04+T-E dan 0.055+T-E sekitar 1.0 MeV pada Z = 29. Parameter set 0.0-T-E, 0.0+T+E dan 0.04+T+E merupakan parameter set yang

memiliki perbedaan cukup kecil dengan eksperimen sekitar 0.5% atau 0.8 MeV.



Gambar 3. (Atas) Energi separasi satu proton S_p untuk isoton N = 28 dengan variasi parameter set model RMF dan hasil eksperimen. (Bawah) Presentase antara S_p hasil perhitungan dengan model RMF dan S_p hasil eksperimen.

Pada Gambar 4 (atas) terlihat energi Fermi proton memiliki nilai mendekati nol sebesar -0.6088 MeV pada Z = 29 serta menjadi positif pada Z = 31 sebesar 0.0768 MeV.



Gambar 4. (Atas) Energi partikel tunggal proton dengan model RMF untuk parameter set 0.04+T+E pada isoton N = 28 (inti ganjil). (Bawah) Energi partikel tunggal proton dan occupancy untuk level $1f_{5/2}$ dan $2p_{3/2}$ yang merupakan level dalam keadaan resonan.

Sedangkan, pada Gambar 4 (bawah) terlihat bahwa level $1f_{5/2}$ lebih dahulu mendekati nol pada Z = 25 dan memiliki nilai energi positif pada Z = 27. Namun occupancy level tersebut masih nol atau dapat dikatakan tidak adanya partikel yang mengisi level tersebut. Pada Z = 31 terlihat energi partikel tunggal sebesar 0.1762 MeV dan *occupancy* juga meningkat menjadi sekitar 0.4. Maka, dapat dikatakan bahwa Z = 31 diprediksi sebagai satu proton dripline pada rantai isoton N = 28.

Sama halnya dengan dua proton dripline, bahwa kopling isovektor-isoskalar, tensor, dan *electromagnetic exchange* tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap prediksi satu proton dripline, baik menggunakan energi separasi maupun dengan energi partikel tunggal.

Perhitungan dengan model RMF standar (parameter set TMA) dilakukan oleh Saxena (lihat Gambar 5). Dapat kita lihat bahwa hasil perhitungan dengan model RMF termodifikasi dengan parameter set TMA memiliki hasil yang tidak jauh berbeda. Pada parameter set TMA juga menunjukkan bahwa dua proton dripline terdapat pada Z = 30. Maka, dapat dikatakan bahwa hasil penelitian untuk proton dripline pada isoton N = 28 memiliki hasil yang cukup presisi. Selain itu, jika kita lihat dengan parameter set TMA yang tidak memiliki suku kopling isovektor-isoskalar, tensor, dan *electromagnetic exchange*, maka jelas dapat dikatakan bahwa prediksi dua proton dripline pada isoton N = 28 tidak memiliki pengaruh yang signifikan pada ketiga faktor tersebut.



Gambar 5. Energi separasi dua proton (S_{2p}) untuk ketujuh variasi parameter set model RMF dan hasil eksperimen, serta hasil perhitungan model RMF (TMA) oleh Saxena.

Dalam menganalisis lebih jauh pengaruh kopling isovektor-isoskalar, tensor dan *electromagnetic exchange* terhadap prediksi satu dan dua proton dripline, kita dapat membuat korelasi terhadap energi simetri (E_{sym}) dan *slope* (L). Energi simetri dan *slope* memiliki nilai yang berbeda untuk setiap variasi parameter set karena mewakili sifat masing-masing variasi parameter set. Dari sini, kita bisa melihat pengaruh tensor, *electromagnetic exchange* dan kopling isovektor-isokalar terhadap sifat *bulk* proton dripline, seperti skin, jari-jari muatan, dan sebagainya.



Gambar 6. Korelasi energi simetri dengan skin untuk (a) inti genap, (b) inti ganjil dan korelasi slope dengan skin untuk (c) inti genap, (d) inti ganjil pada isoton N = 28. Besarnya korelasi dapat dilihat melalui nilai r^2 , dimana nilai $r^2 \sim 1$ dapat dikatakan memiliki korelasi yang kuat.

Pada Gambar 6 dapat dilihat bahwa korelasi satu dan dua proton dripline terhadap skin cukup kecil (nilai $r^2 \sim 0.6$), baik terhadap energi simetri maupun *slope*. Ini belum dapat dikatakan memiliki korelasi yang kuat diantara keduanya. Begitu juga dengan jarijari rms, jari-jari difraksi, ketebalan permukaan, dan energi ikat. Maka, dapat dikatakan bahwa sifat *bulk* proton dripline pada isoton N = 28 tidak memiliki korelasi yang kuat terhadap energi simetri dan *slope*.

4. Kesimpulan

Prediksi dua proton dripline pada isoton N = 28 menggunakan metode energi separasi dan energi partikel tunggal menunjukkan hasil yang sama. Dua proton dripline pada isoton N = 28 diprediksi berada pada Z = 30. Selain itu, didapatkan pula indikasi adanya magic number pada Z = 28, sehingga inti ⁵⁶Ni sebagai *double magic number*. Sedangkan, prediksi satu proton dripline pada rantai isoton N = 28 berada pada jumlah proton, Z = 31. Berdasarkan analisis juga didapatkan bahwa sifat *bulk* proton dripline pada isoton N = 28 tidak memiliki korelasi yang kuat terhadap energi simetri dan *slope*.

Daftar Acuan

- Smolańczuk, R., Dobaczewski, J. Particle-drip lines from the Hartree-Fock-Bogoliubov theory with Skyrme interaction. arXiv: nucl-th. 9307023. (1993). p. 1-13.
- [2]. Balbuena, E. T. Hartree-Fock-Bogoliubov Calculations for Nuclei Far From Stability. Nashville. Tennessee. (2003).
- [3]. Reinhard, P.G. The Relativistic mean-field model of the nucleon.

- [4]. Saxena, G. Singh, D. Study of Neutron Magic Drip-Line Within Relativistic Mean-Field Plus BCS Approach. International Journal of Modern Physics E 22. 1350025. (2013). p. 1-18.
- [5]. Dutra, M., et al. Relativistic mean-field hadronic models under nuclear matter constraints. Physical Review C 90, 055203. (2014). p. 11.
- [6]. Qiang, G. H, Liang, H, et al. Slater Approximation for Coulomb Exchange Effects in Nuclear Covariant Density Functional Theory. Phys. Rev. C 87, 041301. (2013). p. 1-5.
- [7]. Sulaksono, A. Electromagnetic and Isovector Terms in Standard Relativistic Mean Field Model. International Journal of Modern Physics E 20. No. 9. (2011). p.1983-2010
- [8]. Audi, G., A.H. Wapstra, and C. Thibault. The AME2003 Atomic Mass Evaluation* (II). Tables, Graphs and References. Nuclear Physics A 729, (2003). p.337–676