

## Massa Medan Skalar pada Model Standar dengan Ekstensi grup $Z_4 \otimes Z_2$

Istikomah<sup>1\*</sup>, Siti Fatimah<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Prodi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Walisongo

\*E-mail: [istikomah@walisongo.ac.id](mailto:istikomah@walisongo.ac.id)

### Article History:

Received: 09 April 2023

Revised: 14 April 2023

Accepted: 15 April 2023

**Keywords:** Model Standar, Grup siklik, medan skalar

**Abstract:** Model Standar dengan tambahan grup tera  $Z_4 \otimes Z_2$  merupakan salah satu perluasan Model Standar yang diusulkan untuk menyelesaikan masalah yang ada di Model Standar. Pada model in terdapat medan skalar Model Standar  $\phi$ , tambahan medan skalar dublet  $\eta$  dan medan skalar singlet  $\phi_s$ . Pembangkitan massa medan skalar dengan meninjau potensial skalar. Nilai harap vakum medan yang diperoleh setelah terjadi perusakan simetri diasumsikan  $v_\phi < v_\eta < v_{\phi_s}$ . Medan skalar yang diekspansikan disekitar harap vakumnya dapat membangkitkan massanya. Hasil penelitiannya adalah massa medan skalar  $\phi$  sama seperti massa medan skalar Model standar, dan massa medan skalar  $\eta$  lebih kecil dari  $\phi_s$ ,  $m_\eta < m_{\phi_s}$ .

### PENDAHULUAN

Di alam semesta terdapat empat interaksi fundamental, yaitu interaksi kuat, lemah, elektromagnetik, dan gravitasi. Para fisikawan berharap ada teori tunggal yang dapat menjelaskan keempat interaksi, tetapi sampai saat ini belum ada. Melalui uji laboratorium, teori saat ini yang dianggap telah mampu menggabungkan interaksi kuat, lemah, dan elektromagnetik, yaitu Model Standar Fisika Partikel. Walaupun Model Standar adalah teori paling mapan saat ini, tak menutup kemungkinan bahwa model ini memiliki beberapa kelemahan yang tidak bisa menjelaskan beberapa hal diantaranya; terdapat hierarki massa dari tiga generasi lepton dan quark osilasi neutrino, keberadaan materi, ketidaksimetrian barion di alam semesta (Albertus H Panuluh et al., 2015). Oleh karena itu, untuk menutupi kelemahan-kelemahan tersebut para fisikawan partikel masih berupaya untuk memperluas Model Standar. Perluasan Model Standar diantaranya adalah supersymmetry (Allanach, 2017) Grand Unified Theory (de Anda et al., 2020), Model Simetri Kiri Kanan Termodifikasi (Istikomah, 2020), dan Ekstensi Model Standar (Haniah et al., 2020). Terdapat tiga kajian penelitian sebelumnya sebagai acuan dalam penelitian ini. Yang pertama, Model Korespondensi Spinor Skalar yang dikaji oleh (Panuluh & Satriawan, 2017) dengan grup tera  $SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$  untuk pembangkitan massa neutrino. Di dalam penelitiannya, juga dikaji pembangkitan massa partikel skalar dan massa elektron, quark up dan down. Partikel yang digunakan adalah enam buah medan skalar yang pasangannya medan spinor di Model Standar. Massa partikel skalar dibangkitkan melalui potensial Higgs, sedangkan massa elektron, quark up dan down dibangkitkan melalui Lagrangian Yukawa.

Model Simetri Kiri Kanan yang digunakan untuk pembangkitan massa lepton dan massa quark adalah model alami baru simetri kiri-kanan berdasarkan grup tera  $SU(2)_L \otimes SU(2)_R \otimes$

$U(1)$  yang diusulkan oleh Setyadi & Satriawan, (2017). Partikel yang digunakan adalah lepton ( $LLR, ELR, NLR$ ), quark ( $QLR$ ), Higgs ( $\chi LR$  dan  $\Phi$ ), dan partikel tambahan dua singlet fermion dan bilangan kuantum global ( $K$  dan  $K'$ ). pada penelitian ini hanya dibahas pembangkitan massa lepton saja, tidak dibahas tentang pembangkitan massa medan skalar.

Pengembangan Ekstensi Model Standar dilakukan oleh Haniah et al., (2020) yaitu Ekstensi Minimal Model Standar dengan grup tera  $SU(2) \otimes U(1) \otimes Z_2$ . Partikel yang terdapat dalam model ini adalah fermion generasi pertama lepton dan quark left-handed, Higgs doublet Model Standar  $\phi$  ditambah dengan Higgs doublet baru  $\eta$ , Higgs singlet baru  $\phi_s$ , dan neutrino right-handed singlet. Berdasarkan penelitian ini, melalui kopling Yukawa antara Higgs doublet  $\phi$  dengan fermion diperoleh massa lepton bermuatan dan massa quark. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui massa medan skalar berdasarkan grup tera  $SU(3) \otimes SU(3)_L \otimes Z_4 \otimes Z_2$  menggunakan partikel fermion generasi pertama lepton dan quark left-handed, Higgs doublet Model Standar  $\phi$  baru  $\eta$ , Higgs singlet baru  $\phi_s$  dan neutrino right-handed singlet.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian teoritis. Adapun alur penelitiannya adalah

1. Mengkonstruksi daftar partikel berdasarkan Model Standar dengan tambahan grup tera  $Z_4 \otimes Z_2$
2. Mengkonstruksi potensial skalar berdasarkan grup tera  $SU(3) \otimes SU(3)_L \otimes Z_4 \otimes Z_2$
3. Mencari nilai harap vakum masing-masing medan skalar
4. Mencari potensial skalar dengan medan yang sudah diekspansikan disekitar nilai harap vakumnya
5. Mencari suku-suku massa berdasarkan potensial skalar

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Daftar partikel-partikel yang terdapat pada Model Standar berdasarkan grup tera  $SU(3) \otimes SU(3)_L \otimes Z_4 \otimes Z_2$  ditunjukkan oleh Tabel 1. Angka pertama dan kedua wakilkan fundamental pada Table 1 menunjukkan menunjukkan dimensi grup  $SU(3)$  dan  $SU(2)_L$ , sedangkan tiga angka selanjutnya menunjukkan bilangan hypercharge dan eigen nilai dari  $Z_4$  dan  $Z_2$ . Penambahan grup tera  $Z_4$  dan  $Z_2$  dilakukan untuk mewakili neutrino right handed yang sebelumnya tidak ada di Model Standar. Grup  $Z_4$  dan  $Z_2$  merupakan grup simetri siklik. Grup  $Z_4$  memiliki empat anggota, yaitu  $(-i, i, -1, 1)$ , sedangkan grup  $Z_2$  memiliki dua anggota, yaitu  $(-1, 1)$ . Transformasi grup  $Z_4$  dan  $Z_2$  ditunjukkan oleh Persamaan (1) dan (2)

$$Z_4: \phi \rightarrow \phi, \eta \rightarrow \eta, \phi_s \rightarrow -\phi_s \quad (1)$$

$$Z_2: \phi \rightarrow \phi, \eta \rightarrow -\eta, \phi_s \rightarrow \phi_s \quad (2)$$

**Tabel. 1 Daftar Partikel**

Partikel	Wakilan Fundamental	Medan Skalar	Wakilan Fundamental
$\ell_L$	$(1, 2, -1, 1, +1)$	$\phi$	$(1, 2, +1, 1, +1)$
$e_R$	$(1, 1, -2, 1, +1)$	$\eta$	$(1, 2, +1, i, -1)$
$\nu_R$	$(1, 1, 0, 1, -1)$	$\phi_s$	$(1, 1, 0, i, +1)$
$q_L$	$\left(3, 2, +\frac{1}{3}, +1\right)$		

---

$u_R$	$(3, 1, +\frac{4}{3}, 1, +1)$
$d_R$	$(3, 1, -\frac{2}{3}, 1, +1)$

---

Suku-suku potensial skalar yang dikonstruksi berdasarkan invariansi terhadap grup tera  $SU(3) \otimes SU(3)_L \otimes Z_4 \otimes Z_2$  ditunjukkan oleh Persamaan (3)

$$\begin{aligned}
 V = & \frac{1}{2} \mu_1^2 \phi^2 + \frac{1}{2} \mu_2^2 \eta^2 + \frac{1}{2} \mu_3^2 \phi_s^2 + \frac{1}{4} \lambda_1 \phi^4 + \frac{1}{4} \lambda_2 \eta^4 \\
 & + \frac{1}{4} \lambda_3 \phi_s^4 + \frac{1}{4} \lambda_4 \phi^2 \eta^4 + \frac{1}{2} \lambda_5 \phi^2 \phi_s^2 + \frac{1}{2} \lambda_6 \eta^2 \phi_s^2 \\
 & + \frac{1}{2} \lambda_7 \phi^\dagger \eta \eta^\dagger \phi + \frac{1}{2} \lambda_8 \phi^\dagger \phi_s \phi_s^\dagger \phi + \frac{1}{2} \lambda_9 \eta^\dagger \phi_s \phi_s^\dagger \eta
 \end{aligned} \quad (3)$$

Symbol  $\mu_i$  dan  $\lambda_i$  menunjukkan besarnya konstanta kopling interaksi. Persamaan (3) menunjukkan interaksi antar medan skalar yang ada pada ekstensi Model standar dengan tambahan  $Z_4 \otimes Z_2$ . Suku-suku yang mengandung dua medan menunjukkan suku massa, sedangkan suku-suku yang mengandung empat medan, menunjukkan suku interaksi.

Ketika terjadi perusakan simetri secara spontan, medan-medan skalar mengambil nilai VEV yang ditunjukkan oleh Persamaan (4)

$$\langle \phi \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v_\phi \end{pmatrix}, \quad \langle \eta \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v_\eta \end{pmatrix}, \quad \langle \phi_s \rangle = v_{\phi_s} \quad (4)$$

Persamaan (4) disubstitusikan ke dalam Persamaan (3), kemudian dicari differensial potensial terhadap masing-masing nilai VEV medan skalar untuk mendapatkan nilai ekstremumnya seperti yang ditunjukkan oleh Persamaan (5)

$$\frac{\partial V}{\partial v_\phi} = 0, \quad \frac{\partial V}{\partial v_\eta} = 0, \quad \frac{\partial V}{\partial v_{\phi_s}} = 0 \quad (5)$$

Persamaan (5) disubstitusikan ke dalam Persamaan (4) sehingga diperoleh nilai  $v_\phi, v_\eta$  dan  $v_{\phi_s}$  yang ekstremum seperti yang ditunjukkan oleh Persamaan (6,7,8)

$$v_\phi = \pm \sqrt{\frac{-\mu_1^2 - v_\eta^2(\lambda_4 + \lambda_7) - v_{\phi_s}^2(\lambda_5 + \lambda_8)}{\lambda_1}} \quad (6)$$

$$v_\eta = \pm \sqrt{\frac{-\mu_2^2 - v_\phi^2(\lambda_4 + \lambda_7) - v_{\phi_s}^2(\lambda_6 + \lambda_8)}{\lambda_2}} \quad (7)$$

$$v_{\phi_s} = \pm \sqrt{\frac{-\mu_3^2 - v_\phi^2(\lambda_4 + \lambda_7) - v_\eta^2(\lambda_5 + \lambda_8)}{\lambda_3}} \quad (8)$$

Nilai harap untuk medan skalar  $\phi$  yang ditunjukkan oleh Persamaan (6) menunjukkan bahwa

nilainya dipengaruhi oleh nilai harap dari medan skalar  $\eta$  dan  $\phi_s$ . Begitu pula untuk Persamaan (7) dan (8). Nilai harap dari ketiga medan skalar saling terkople.

Massa medan skalar dapat dibangkitkan dengan cara mengekspansikan medan skalar disekitar nilai harap vakum dengan pergeseran sebesar  $h$ . Selanjutnya disubstitusikan kembali ke Persamaan (3) sehingga diperoleh suku-suku yang terdiri dari medan campuran seperti  $h_\eta h_\phi$ ,  $h_\eta h_{\phi_s}$  dan  $h_\phi h_{\phi_s}$ . Suku-suku ini diabaikan karena menunjukkan adanya massan medan skalar yang saling tercampur seperti yang ditunjukkan oleh Persamaan (9)

$$V \supset h_\phi h_\eta (2\lambda_4 v_\phi v_\eta + 2\lambda_7 v_\phi v_\eta) + h_\phi h_{\phi_s} (2\lambda_5 v_\phi v_{\phi_s} + 2\lambda_8 v_\phi v_{\phi_s}) + h_{\phi_s} h_\eta (2\lambda_6 v_{\phi_s} v_\eta + 2\lambda_9 v_{\phi_s} v_\eta) \quad (9)$$

Suku-suku yang mengandung medan  $h_\phi^2$ ,  $h_\eta^2$  dan  $h_{\phi_s}^2$  menunjukkan massa medan skalar  $\phi$ ,  $\eta$  dan  $\phi_s$  seperti yang ditunjukkan oleh Persamaan (10)

$$V \supset h_\phi^2 \left( \frac{\mu_1^2}{2} + \frac{3\lambda_1 v_\phi^2}{2} + \frac{\lambda_4 v_\eta^2}{2} + \frac{\lambda_5 v_{\phi_s}^2}{2} + \frac{\lambda_7 v_\eta^2}{2} + \frac{\lambda_8 v_{\phi_s}^2}{2} \right) + h_\eta^2 \left( \frac{\mu_2^2}{2} + \frac{3\lambda_2 v_\eta^2}{2} + \frac{\lambda_4 v_\phi^2}{2} + \frac{\lambda_6 v_{\phi_s}^2}{2} + \frac{\lambda_7 v_\phi^2}{2} + \frac{\lambda_9 v_{\phi_s}^2}{2} \right) + h_{\phi_s}^2 \left( \frac{\mu_3^2}{2} + \frac{3\lambda_3 v_{\phi_s}^2}{2} + \frac{\lambda_5 v_\phi^2}{2} + \frac{\lambda_6 v_\eta^2}{2} + \frac{\lambda_8 v_\phi^2}{2} + \frac{\lambda_9 v_\eta^2}{2} \right) \quad (10)$$

Massa medan skalar  $\phi$ ,  $\eta$  dan  $\phi_s$  dapat dilakukan dengan membandingkan suku massa partikel  $\frac{1}{2} m_i h_i^2$  terhadap Persamaan (10) sehingga diperoleh Persamaan (11,12,13)

$$m_{h_\phi} = \sqrt{2\lambda_1 v_\phi^2} \quad (11)$$

$$m_{h_\eta} = \sqrt{2\lambda_2 v_\eta^2} \quad (12)$$

$$m_{h_{\phi_s}} = \sqrt{2\lambda_3 v_{\phi_s}^2} \quad (13)$$

Diasumsikan nilai  $v_\phi < v_\eta < v_{\phi_s}$ , sehingga massa paling kecil adalah  $m_\phi$  dan massa yang paling besar adalah  $m_{\phi_s}$ . Massa medan skalar  $\eta$  rentang massanya diantara  $m_\phi$  dan  $m_\eta$ . Hasil massa medan skalar  $\phi$  pada Persamaan (11) sesuai dengan hasil medan sklar Higgs yang diprediksi oleh Model Standar (Collins et al., 1989)(Halzen & Martin, 1984). Massa medan skalar  $\eta$  sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Haniah et al., (2020), sedangkan massa medan skalar  $\phi_s$  berbeda dengan hasil penelitian Haniah et al., (2020) karena adanya perbedaan simetri yaitu adanya tambahan grup simetri  $Z_4$ .

## KESIMPULAN

Nilai harap vakum medan yang diperoleh setelah terjadi perusakan simetri diasumsikan  $v_\phi < v_\eta < v_{\phi_s}$ . Medan skalar yang diekspansikan disekitar harap vakumnya dapat membangkitkan massanya. Hasil penelitiannya adalah massa medan skalar  $\phi$  sama seperti massa medan skalar Model standar, dan massa medan skalar  $\eta$  lebih kecil dari  $\phi_s$ ,  $m_\eta < m_{\phi_s}$ .

## DAFTAR REFERENSI

- Allanach, B. C. (2017). Beyond the standard model. *CERN Yellow Reports: School Proceedings*, 5(June), 123–152. <https://doi.org/10.23730/CYRSP-2017-005.123>
- Collins, P. D. B., Martin, A. D., & Squires, E. J. (1989). *Particle Physics and Cosmology*. John Wiley & Sons.
- de Anda, F. J., King, S. F., & Perdomo, E. (2020).  $SU(5)$  grand unified theory with  $A_4$  modular symmetry. *Physical Review D*, 101(1), 15028. <https://doi.org/10.1103/physrevd.101.015028>
- Halzen, F., & Martin, A. D. (1984). *Quark And Leptons: an Introductory Course in Modern Particle Physics*. John Wiley & Sons.
- Haniah, S. R., Istikomah, Khalif, M. A., & Kusuma, H. H. (2020). Scalar Field Mass Generation in the Gauge Theory  $SU(2)_X U(1)_{XZ2}$ . *Journal of Physics: Conference Series*.
- Istikomah. (2020). Pembangkitan Massa Medan Skalar dan Boson Tera pada Model Simetri Kiri Kanan Termodifikasi Berdasarkan Grup Tera  $SU(3) \otimes SU(2)_L \otimes SU(2)_R \otimes U(1)_Y$ . *Jurnal Fisika*, 10(2), 35–41.
- Panuluh, Albertus H, Fauzi, F., & Satriawan, M. (2015). *Model Korespondensi Spinor-Skalar*. April.
- Panuluh, Albertus Hariwangsa, & Satriawan, M. (2017). *Pembangkitan Massa Neutrino Dalam Model Korespondensi Spinor- Skalar Neutrino Mass Generation in Spinor-Scalar Correspondence Model*. 1(1), 1–4.
- Setyadi, C., & Satriawan, M. (2017). Pembangkitan Massa Partikel Pada Model Simetri Kiri-Kanan Alami dengan Tambahan Bilangan Kuantum Global. *Prosiding Pertemuan Dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan Dan Teknologi Nuklir*.