

# Pembangkitan Massa Neutrino Dalam Model Korespondensi Spinor-Skalar

(masuk/received 4 Juni 2016, diterima/accepted 28 Juni 2016)

## *Neutrino Mass Generation in Spinor-Scalar Correspondence Model*

Albertus Hariwangsa Panuluh\*, Mirza Satriawan\*\*

\*Prodi Pendidikan Fisika, Universitas Sanata Dharma Yogyakarta  
Kampus III USD, Paingan, Maguwoharjo, Depok, Sleman, Yogyakarta 55282  
panuluh@usd.ac.id

\*\*Departemen Fisika, Universitas Gadjah Mada Yogyakarta  
Sekip Utara Bulaksumur, Yogyakarta 55281

**Abstrak** – Model pengembangan dari model standar dengan prinsip korespondensi spinor-skalar telah dibangun. Diperkenalkan enam buah medan skalar baru sebagai partikel korespondensi bagi spinor model standar. Berbagai eksperimen telah menunjukkan adanya osilasi neutrino, dan hal ini dapat terjadi jika neutrino memiliki massa. Oleh karena itu, setiap model pengembangan model standar harus mampu menjelaskan massa neutrino. Massa neutrino dalam model korespondensi spinor-skalar dapat dibangkitkan dengan menggunakan mekanisme seesaw dan dapat memiliki nilai massa yang sangat kecil.

**Kata kunci:** model standar, massa neutrino, supersimetri, mekanisme seesaw

**Abstract** – We have build an extension of standard model base on the spinor-scalar correspondence principle. Six new scalar fields have been introduced as the corresponding particles for the spinors in the standard model. Many experiments have indicated that neutrinos is oscillating, which can happen only if neutrinos have masses. Thus every extension of the standard model has to be able to explain the neutrino mass. Neutrino mass in the spinor-scalar correspondence model can be generated using seesaw mechanism, and can have a very small value.

**Key words:** standard model, neutrino mass, supersymmetry, seesaw mechanism

## I. PENDAHULUAN

Seiring dengan perkembangan teknologi, fisika partikel juga telah mengalami perkembangan. Keberhasilan tim CMS dan ATLAS di LHC mendeteksi partikel boson Higgs merupakan salah satu pencapaian besar fisikawan partikel pada era ini [1]. Terdapat empat jenis interaksi di alam semesta, yaitu interaksi kuat, lemah, elektromagnetika, dan gravitasi. Model standar (MS) fisika partikel berhasil menjelaskan tiga jenis interaksi (kecuali gravitasi). Di dalam MS hanya ada satu partikel skalar yaitu boson Higgs yang berperan untuk membangkitkan massa partikel-partikel dalam MS.

MS dikatakan belum lengkap karena tidak mampu menjelaskan beberapa hal di antaranya: osilasi neutrino [2], masalah hierarki [3], ketaksimetrian barion di alam semesta [4], dan keberadaan materi gelap [5]. Oleh karena itu para fisikawan partikel masih berupaya untuk memperluas MS.

Salah satu model pengembangan MS yang mampu menyelesaikan masalah hierarki adalah supersimetri (SUSY) [6]. Supersimetri adalah suatu simetri antara boson dan fermion. Model pengembangan supersimetrik untuk MS disebut Model Standar Supersimetrik Minimal (MSSM) di mana setiap partikel dalam model standar memiliki pasangan-super (*superpartner*) nya, yaitu setiap boson memiliki pasangan fermion dan setiap fermion memiliki pasangan boson. Selain masalah hierarki, pada perkembangannya terkini SUSY mampu menjelaskan banyak hal di antaranya: momen magnet muon, penyatu-

an kopling ketiga interaksi pada energi tinggi (*Grand Unified Theory*), dan partikel SUSY yang paling ringan (*Lightest Supersymmetric Particle*) diduga mampu menjadi kandidat materi gelap [7].

Banyak masalah dalam MS yang dapat dijelaskan menggunakan SUSY. Namun partikel SUSY yang paling ringan, yaitu neutralino, belum ditemukan, maka boleh diduga neutralino dan semua gaugino sebenarnya tidak ada di alam. Ini berarti aljabar SUSY harus dirombak agar tidak menyertakan sektor medan tera. Tetapi merombak aljabar SUSY agar tidak menyertakan sektor tera bukanlah hal yang mudah, dan hingga saat ini belum dapat diwujudkan. Akan tetapi ide menggunakan simetri SUSY hanya pada sektor skalar dan spinor tanpa sektor tera dapat direalisasikan dengan sederhana, yaitu berupa korespondensi antara spinor dan skalar. Kami telah mengusulkan model Korespondensi Spinor Skalar (KSS) di pustaka [8]. Pada model ini untuk setiap partikel spinor dengan bilangan kuantum tera tertentu terdapat partikel skalar korespondensinya dengan bilangan kuantum tera yang sama, demikian pula sebaliknya, sedangkan untuk sektor medan tera tidak memiliki pasangan korespondensi. Konsekuensi dibangunnya model KSS adalah adanya peluruhan nukleon (proton dan neutron) yang tidak terdeteksi dalam MS, serta adanya partikel leptoquark yang melanggar bilangan lepton dan barion [8]. Status terakhir terkait dengan peluruhan nukleon dari kolaborasi Sudbury Neutrino Observatory (SNO) diperoleh nilai batas bawah untuk waktu hidup nukleon adalah  $\tau_{inv} > 2 \times 10^{29}$  tahun [9].

Neutrino merupakan partikel yang masih misterius hingga saat ini. Awalnya diperkenalkan oleh Pauli pada tahun 1930 sebagai sebuah partikel yang membawa energi yang hilang pada peluruhan beta. Dalam MS, hanya ada neutrino kidal. Beberapa model pengembangan MS memperkenalkan singlet neutrino tak-kidal. Model KSS juga memperkenalkan singlet neutrino tak-kidal. Selain itu, dahulu diduga neutrino tidak bermassa. Namun hasil eksperimen yang dilakukan oleh SNO, Super Kamiokande, dan beberapa detektor neutrino lain menunjukkan bahwa neutrino yang berasal dari matahari mengalami osilasi (berubah *flavor*) [10]. Peristiwa osilasi neutrino hanya dapat berlangsung jika neutrino memiliki massa.

Atas dasar fakta ini, neutrino pada semua model pengembangan MS harus mampu menjelaskan massa neutrino. Dalam penelitian ini akan diteliti pembangkitan massa neutrino.

## II. MODEL KSS

Model KSS merupakan pengembangan dari MS dengan memperkenalkan enam buah medan skalar yang masing-masing medan skalar merupakan pasangan dari medan spinor yang ada di MS ditambah dengan neutrino tak-kidal. Tabel 1 menunjukkan isi partikel dalam model

KSS, dengan  $l_L = \begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L$  adalah dublet lepton  $SU(2)_L$

dan  $q_L = \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L$  adalah dublet quark.

Bentuk potensial skalar dalam model KSS paling umum yang invarian terhadap transformasi tera SM dan melibatkan semua medan skalar dalam model KSS adalah sebagai berikut [8]

$$\begin{aligned}
V = & -\mu_1^2 |\phi|^2 - \mu_2^2 |\rho|^2 - \mu_3^2 |\eta|^2 - \mu_4^2 |\xi|^2 - \mu_5^2 |\chi|^2 \\
& - \mu_6^2 |\omega|^2 + \lambda_1 |\phi|^4 + \lambda_2 |\rho|^4 + \lambda_3 |\eta|^4 + \lambda_4 |\xi|^4 \\
& + \lambda_5 |\chi|^4 + \lambda_6 |\omega|^4 + \alpha_1 |\phi|^2 |\rho|^2 + \alpha_2 |\phi|^2 |\eta|^2 \\
& + \alpha_3 |\phi|^2 |\xi|^2 + \alpha_4 |\phi|^2 |\chi|^2 + \alpha_5 |\phi|^2 |\omega|^2 \\
& + \beta_1 |\rho|^2 |\eta|^2 + \beta_2 |\rho|^2 |\xi|^2 + \beta_3 |\rho|^2 |\chi|^2 \\
& + \beta_4 |\rho|^2 |\omega|^2 + \gamma_1 |\eta|^2 |\xi|^2 + \gamma_2 |\eta|^2 |\chi|^2 \\
& + \gamma_3 |\eta|^2 |\omega|^2 + \zeta_1 |\xi|^2 |\chi|^2 + \zeta_2 |\xi|^2 |\omega|^2 \\
& + \varphi |\chi|^2 |\omega|^2 + \delta_1 (\omega \xi \xi) + \delta_2 (\chi \phi^\dagger \omega^\dagger) \\
& + \delta_3 (\omega \xi^\dagger \rho) + \delta_4 (\xi \xi \xi \rho^\dagger)
\end{aligned} \quad (1)$$

dengan simbol Yunani selain medan partikel ( $\mu_1, \dots, \delta_4$ ) adalah tetapan.

Supaya foton dan gluon tidak bermassa setelah mengalami perusakan simetri secara spontan (*spontaneous symmetry breaking*), maka hanya medan skalar yang memiliki muatan elektromagnetik neutral

**Tabel 1.** Medan spinor dan medan skalar disertai dimensi wakilan dan bilangan kuantum dalam model KSS.

Medan Spinor	Medan Skalar	$SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$
$l_L$	$\phi$	<b>1,2,-1</b>
$e_R$	$\rho$	<b>1,1,-2</b>
$\nu_R$	$\eta$	<b>1,1,0</b>
$d_R$	$\xi$	<b>3,1,-2/3</b>
$q_L$	$\chi$	<b>3,2,1/3</b>
$u_R$	$\omega$	<b>3,1,4/3</b>

yaitu  $\phi$  dan  $\eta$  yang boleh mempunyai nilai harap vakum (*Vacuum Expectation Value*, VEV) yang tak nol. Bentuk VEV bagi medan  $\phi$  dan  $\eta$  ditunjukkan dalam persamaan

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

dengan  $v_\phi$  dan  $v_\eta$  adalah VEV bagi medan skalar  $\phi$  dan  $\eta$ . Dengan melakukan substitusi persamaan (2) ke persamaan (1), diperoleh nilai potensial skalar pada keadaan dasar/vakum setelah perusakan simetri secara spontan

$$V = -\frac{1}{2} \mu_1^2 v_\phi^2 - \mu_3^2 v_\eta^2 + \frac{1}{4} \lambda_1 v_\phi^4 + \lambda_3 v_\eta^4 + \frac{1}{2} \alpha_2 v_\phi^2 v_\eta^2. \quad (3)$$

Dari persamaan (3) dapat diperoleh nilai minimum dari potensial skalar dan dapat diperoleh nilai VEV bagi masing-masing medan skalar

$$\begin{aligned}
v_\phi &= \pm \sqrt{\frac{2\alpha_2 \mu_3^2 - 4\mu_1^2 \lambda_3}{\alpha_2 - 4\lambda_3 \lambda_1}}, \\
v_\eta &= \pm \sqrt{\frac{\alpha_2 \mu_1^2 - 2\mu_3^2 \lambda_1}{\alpha_2^2 - 4\lambda_3 \lambda_1}}.
\end{aligned} \quad (4)$$

## III. PEMBANGKITAN MASSA

### A. Massa Partikel Skalar

Untuk membangkitkan massa keenam partikel skalar dalam model KSS maka dilakukan ekspansi di sekitar VEV setiap medan skalar. Bentuk ekspansinya ditunjukkan sebagai

$$\begin{aligned}
\phi &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} v_\phi + h_\phi \\ 0 \end{pmatrix}, & \eta &= v_\eta + h_\eta, & \rho &= h_\rho \\
\xi &= h_\xi, & \chi &= \begin{pmatrix} h_{\chi^1} \\ h_{\chi^2} \end{pmatrix}, & \omega &= h_\omega.
\end{aligned} \quad (5)$$

Dari bilangan kuantum serta dimensi wakil grup teranya,  $\phi$  tidak lain adalah medan Higgs SM (yang terotasi) sehingga nilai  $v_\phi$  tak lain adalah nilai VEV untuk partikel Higgs MS yaitu 246 GeV [11]. Persamaan (5), disubstitusi ke persamaan (1), kemudian setelah dilakukan penjabaran dan suku campuran diabaikan, maka massa bagi keenam medan skalar

$$\begin{aligned} m_\phi &\approx \sqrt{2\lambda_1 v_\phi^2}, \\ m_\eta &\approx \sqrt{8\lambda_3 v_\eta^2}, \\ m_\rho &\approx \sqrt{\frac{1}{2}\alpha_1 v_\phi^2 + \beta_1 v_\eta^2 - \mu_2^2}, \\ m_\xi &\approx \sqrt{\frac{1}{2}\alpha_3 v_\phi^2 + \gamma_1 v_\eta^2 - \mu_4^2}, \\ m_\chi &\approx \sqrt{\frac{1}{4}\alpha_4 v_\phi^2 + \frac{1}{2}\gamma_2 v_\eta^2 - \frac{1}{2}\mu_5^2}, \\ m_\omega &\approx \sqrt{\frac{1}{2}\alpha_5 v_\phi^2 + \gamma_3 v_\eta^2 - \mu_6^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

#### B. Lagrangian Yukawa dan massa elektron, up dan down quark

Massa elektron ( $e$ ), *up quark* ( $u$ ), dan *down quark* ( $d$ ) dapat dibangkitkan dengan membangun Lagrangian Yukawa yang paling umum dalam model KSS. Bagian lagrangian Yukawa, setelah perusakan simetri spontan yang akan memberikan massa fermion adalah

$$\begin{aligned} \mathcal{L} \supset &-G_{\nu_L} \bar{l}_L \phi \nu_R - G_{\nu_R} \bar{e}_R \rho (v_R)^c - G'_{\nu_R} \bar{\eta} \eta (v_R)^c - G_{d_R} \bar{d}_R \xi (v_R)^c \\ &-G_{qu} \bar{q}_L \chi \nu_R - G_{uR} \bar{u}_R \omega \nu_R^c - G_{qu} \bar{q}_L \phi u_R \\ &-G_{qd} \bar{q}_L \phi^c d_R - G_e \bar{l}_L \phi^c e_R - G_{uL} \bar{u}_R \xi e_R^c \\ &-G_{dL} \bar{l}_L \chi^c d_R - G_{qL} \bar{q}_L \xi l_L^c - G_{dR} \bar{d}_R \xi^c u_R^c \\ &-G'_{qd} \bar{d}_R \omega^c d_R^c - G_q \bar{q}_L \xi^c q_L^c - G_l \bar{l}_L \rho l_L^c + h.c \end{aligned} \quad (7)$$

dengan berbagai koefisien  $G$  adalah tetapan kopling interaksi Yukawa, yang secara umum harus berupa matriks untuk menampung informasi tentang ketiga generasi fermion.

Persamaan (7) memuat suku yang dapat membangkitkan massa elektron ( $e$ ), *up quark* ( $u$ ), dan *down quark* ( $d$ ) yaitu suku  $G_e \bar{l}_L \phi^c e_R$ ,  $G_{qu} \bar{q}_L \phi u_R$  dan  $G_{qd} \bar{q}_L \phi^c d_R$  berturut-turut. Dari ketiga suku tersebut diperoleh

$$\begin{aligned} m_e &= \frac{1}{\sqrt{2}} G_e v_\phi, \\ m_u &= \frac{1}{\sqrt{2}} G_{qu} v_\phi, \\ m_d &= \frac{1}{\sqrt{2}} G_{qd} v_\phi. \end{aligned} \quad (8)$$

yakni massa elektron ( $e$ ), *up quark* ( $u$ ), dan *down quark* ( $d$ ).

#### IV. PEMBANGKITAN MASSA NEUTRINO

Terdapat beberapa cara untuk membangkitkan massa neutrino, salah satunya adalah mekanisme *seesaw* tipe-1 [12]. Suku lagrangian untuk mekanisme *seesaw* secara umum adalah

$$f \bar{\nu}_R \nu_L \langle \phi \rangle + \frac{M}{2} \nu_R^c \nu_R. \quad (9)$$

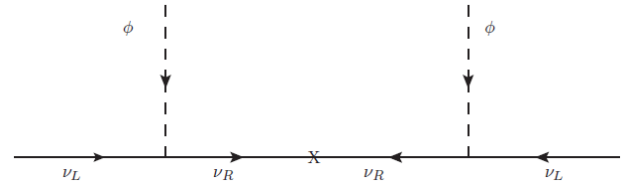
Dari persamaan (7) dapat diperoleh bentuk Lagrangian yang memuat suku yang sama seperti persamaan (9) di atas, yaitu

$$\mathcal{L} \supset -G_{\nu_L} \bar{\nu}_L \phi \nu_R - G'_{\nu_R} \bar{\eta} \eta \nu_R^c + h.c. \quad (10)$$

Kemudian setelah medan skalar  $\phi$  dan  $\eta$  memperoleh VEV masing-masing  $v_\phi$  dan  $v_\eta$ , maka persamaan (10) menjadi

$$\mathcal{L} \supset -G_{\nu} v_\phi \bar{\nu}_L \nu_R - G'_{\nu} v_\eta \bar{\nu}_R \nu_R^c \quad (11)$$

yang diagram Feynman-nya ditunjukkan pada Gambar (1). Dengan membandingkan persamaan (11) dengan persamaan (9), maka diperoleh  $M = 2G'_{\nu} \langle \eta \rangle$  dan  $f = G_{\nu}$ .



**Gambar 1.** Diagram Feynman mekanisme *seesaw* pembangkitan massa neutrino

Massa neutrino dapat diperoleh dengan cara melakukan diagonalisasi matriks massa neutrino dari persamaan (11)

$$\begin{pmatrix} 0 & m \\ m & M \end{pmatrix} \quad (12)$$

dengan  $m = G_{\nu} \langle \phi \rangle$  adalah massa Dirac. Maka massa neutrino dalam model KSS adalah

$$m_{\nu} \approx \frac{m^2}{M}, \quad (13)$$

yang dapat bernilai sangat kecil jika  $M \gg m^2$ . Karena semua kopling konstan di persamaan (7) tidak berdimensi maka dengan alasan kealamian (*naturalness*) nilainya semestinya berorde satu, sehingga di sini diasumsikan bahwa semua kopling konstan di persamaan (7) berorde satu, maka  $v_\phi^2/v_\eta \approx 10^{-9}$  GeV. Dengan memasukkan nilai  $v_\phi = 246$  GeV, maka dapat diperkirakan nilai  $v_\eta \approx 6,05 \times 10^{13}$  GeV yang tidak lain sebanding dengan massa  $M$ . Mekanisme yang telah dideskripsikan tersebut tidak

berbeda jauh dengan mekanisme *seesaw* tipe-1 di pustaka [13]. Perbedaannya di sini nilai  $M$  berasal dari VEV medan skalar  $\eta$ .

Hal yang menarik untuk dikaji lebih lanjut adalah matriks campuran neutrino dalam model KSS. Isu lain yang dapat untuk diteliti adalah masalah ketidaksimetrian barion di alam semesta. Salah satu cara untuk menyelesaikan masalah tersebut adalah leptogenesis yang dihasilkan melalui peluruhan neutrino singlet.

## VI. KESIMPULAN

Model korespondensi spinor-skalar (KSS) merupakan salah satu model yang dapat menjadi alternatif lain dari SUSY yang tidak mengharuskan adanya gaugino. Dalam model ini massa neutrino dapat dibangkitkan menggunakan mekanisme *seesaw* dan massa neutrino memiliki nilai  $m^2/M$  dan akan bernilai sangat kecil jika  $M \gg m^2$ .

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada Program Studi Pendidikan Fisika, FKIP Universitas Sanata Dharma dan Program Studi Fisika, FMIPA Universitas Gadjah Mada atas segala bentuk dukungannya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian ini.

## PUSTAKA

- [1] The ATLAS Collaboration, Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC, *Physics Letter B*, vol. 716, Issue 1, 17 September 2012, pp. 1-29.
- [2] A. Aguilar, *et al.*, Evidence for Neutrino Oscillations from the Observation of Electron Anti-neutrinos in a Muon Anti-Neutrino Beam, *Physical Review D*, vol. 64, no. 112007, 13 November 2001.
- [3] L. Susskind, Dynamics of spontaneous symmetry breaking in the Weinberg-Salam theory, *Physical Review D*, vol. 20, no. 2619, 15 Nopember 1979.
- [4] S. Davidson, M. Losada, A. Riotto, A New perspective on baryogenesis, *Physical Review Letters*, vol. 84, no. 4284, 8 Mei 2000.
- [5] P. Gondolo, G. Gelmini, Compatibility of DAMA dark matter detection with other searchers, *Physical Review D*, vol. 71, no. 123520, 10 Juni 2005.
- [6] J. Wess, B. Zumino, Super gauge transformation in four dimensions, *Nuclear Physics B*, vol. 70, 1974, pp. 39-50.
- [7] V. Berezinsky, A. Bottino, J. Ellis, N. Fornengo, G. Mignola, S. Scopel, Neutralino dark matter in supersymmetric models with non-universal scalar mass terms, *Astroparticle Physics*, Vol. 5, 1-26, 1996.
- [8] A. H. Panuluh, Istikomah, F. Fauzi, dan M. Satriawan, Model Korespondensi Spinor-Skalar, *Prosiding Pertemuan Ilmiah XXIX HFI DIY & Jateng*, April 2015, pp. 119-123.
- [9] S. N. Ahmed, *et al.*, Constraints on Nucleon Decay via Invisible Modes from the Sudbury Neutrino Observatory, *Physics Review Letter*, Vol. 92, 2004.
- [10] Y. Fukuda, *et al.*, Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos, *Physics Review Letter*, Vol. 81, 1998.
- [11] K. A. Olive, *et al.*, Review of Particle Physics, *Chinese Physics C*, Vol. 38, 2014.
- [12] M. Fukugita dan T. Yanagida, *Physics of Neutrinos and Applications to Astrophysics*, Springer-Verlag, 2003.
- [13] R. N. Mohapatra dan G. Senjanovic, Neutrino Mass and Spontaneous Parity Nonconservation, *Physics Review Letter*, Vol. 44, 1980.