

## Tinjauan Mengenai Massa Boson Tera Netral $Z'$ dalam Varian Model Simetri Kiri-Kanan

Akmal Ferdiyan\* dan R. Farzand Abdullatif

Program Studi Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Jenderal Soedirman

Jalan Dr. Suparno No.61 Karangwangkal Purwokerto Jawa Tengah

\*e-mail: aferdiyan@unsoed.ac.id

**Abstrak-** Model simetri kiri-kanan sebagai perluasan (ekstensi) dari model standar fisika partikel telah lama dikenal di kalangan fisikawan. Hingga saat ini telah terdapat banyak variasi dari model simetri kiri-kanan. Salah satu ciri khas dari model ini adalah adanya partikel baru yang tidak terdapat dalam model standar yaitu boson tera netral  $Z'$  atau  $Z_R$ . Partikel  $Z'$  memberikan aspek fenomenologis yang dapat diuji dalam eksperimen yang ada saat ini. Parameter yang menjadi kunci adalah massa  $Z'$ , terkait dengan peluruhannya menjadi partikel dalam model standar. Dalam artikel ini akan dilakukan tinjauan mengenai massa  $Z'$  di dalam berbagai varian model simetri kiri-kanan. Massa  $Z'$  untuk masing-masing model bergantung pada pendekatan terkait perbandingan harga harap vakum Higgs sektor kiri ( $v_L$ ) dan kanan ( $v_R$ ).

**Kata Kunci:** simetri kiri-kanan, massa  $Z'$ , perluasan model standar

*Abstract – The left-right symmetry model as an extension of standard model of particle physics has long been known among physicists. Until now there have been many variations of the left-right symmetry model. One characteristic of this model is the presence of a new particle that is not present in the standard model, namely the neutral gauge boson  $Z'$  or  $Z_R$ .  $Z'$  provides phenomenological aspects that can be tested in current experiments. The key parameter is the mass of  $Z'$ , related to its decay into particles in the standard model. In this article a review of  $Z'$  mass will be carried out in variants of the left-right symmetry model. The mass of  $Z'$  in each model depends on an approximation related to the ratio between vacuum expectation value of left Higgs sector ( $v_L$ ) and right sector ( $v_R$ ).*

**Key words:** left-right symmetry,  $Z'$  mass, extension of standard model

### PENDAHULUAN

Model standar fisika partikel (*Standard Model*, SM) telah lama dipercaya sebagai model yang harus diperluas karena tidak dapat menjelaskan berbagai hal seperti massa neutrino, asimetri partikel-anti partikel, big bang nucleosynthesis, dark matter dan dark energy. Salah satu perluasan model standar adalah model simetri kiri kanan (*Left-Right Symmetry*, LRS), yang berangkat dari ketiadaan arus lemah kanan pada SM [1]. Dengan mengasumsikan keberadaannya, diperoleh model simetri kiri kanan yang menjaga kelestarian paritas. Telah banyak varian dari model ini yang diajukan sebagai perluasan SM, di antaranya mulai dari bentuk awalnya yang mengandung bidublet [2], model yang melakukan duplikasi partikel SM dengan menambahkan partikel partner *chiral* [3], [4], model dengan penambahan simetri  $U(1)$  baru [5], dan juga model dual LRS [6].

Seluruh model LRS itu memiliki partikel boson tera netral (neutral gauge boson) baru jika dibandingkan dengan SM. Dalam SM boson

tera netral adalah boson  $Z$ , sedangkan dalam model LRS selain boson  $Z$  juga akan diperoleh boson  $Z'$  atau dalam beberapa literatur disebut sebagai boson  $Z_R$  karena terkait dengan sektor kanan dari model LRS. Boson  $Z'$  memiliki peran tersendiri dalam seluruh varian model LRS karena memiliki implikasi fenomenologis yang sangat penting, dan menjadi salah satu penanda khas (signature) untuk pengecekan kebenaran suatu model ketika diuji dalam eksperimen di berbagai *collider* yang ada di dunia [7]. Konsekuensi kehadiran  $Z'$  telah dibahas secara umum dalam sebuah *review* yang sangat lengkap di masa lalu [8]. Massa boson  $Z'$  adalah parameter yang terkait erat dengan deteksi berbagai fenomena baru yang tidak ada dalam SM. Oleh karena itu penting untuk dilakukan tinjauan mengenai mekanisme pembentukan massa boson  $Z'$  dalam berbagai varian model LRS, termasuk beberapa model terbaru.

**DESKRIPSI MODEL LRS**

**A. Model LRS secara umum**

Model LRS mengakomodasi simetri kiri kanan, secara umum grup tera (gauge group) model ini minimal mengandung simetri berikut:

$$SU(3) \times SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1) \quad (1)$$

Grup tera ini berbeda dengan grup tera SM yang hanya mengakomodasi arus lemah kiri, yaitu  $SU(3) \times SU(2)_L \times U(1)$ . Varian dari model LRS seluruhnya memiliki grup tera pada persamaan (1), namun kemudian dapat ditambah dengan grup  $U(1)$  baru, simetri baru seperti simetri  $Z_2$ , penambahan bilangan kuantum baru atau variasi pada sektor Higgs. Variasi tersebut menghasilkan model-model yang memiliki aspek fenomenologis yang kaya. Namun demikian pembangkitan massa boson tera dalam seluruh model diberikan oleh mekanisme yang sama, disebabkan oleh simetri yang ada dalam setiap model LRS. Model LRS memiliki 2 nilai harap vakum Higgs yang berbeda, yaitu  $v_L$  dan  $v_R$ , sedangkan dalam SM hanya ada satu nilai harap vakum Higgs yaitu  $v_L$ . Nilai  $v_L$  diasumsikan jauh lebih kecil dibanding  $v_R$  karena sampai saat ini dalam eksperimen belum terdeteksi arus lemah kanan. Nilai konstanta kopling dalam model ini juga ada tiga, yaitu  $g_L$  (kopling dalam SM),  $g_R$  (kopling terkait sektor kanan) serta  $g'$  (kopling sektor  $U(1)$ ). Karena asumsi bahwa sektor kiri dan kanan simetris maka  $g_L = g_R = g$ . Seluruh model LRS menyatakan bahwa dalam energi tinggi paritas bersifat simetris antara kiri dan kanan, namun dalam energi rendah terjadi perusakan simetri sehingga hanya tersisa arus lemah kiri seperti yang terdapat dalam SM [9].

**B. Pembangkitan massa boson tera dalam model LRS**

Massa boson tera dalam model LRS diberikan oleh suku Lagrangian berikut:

$$\mathcal{L}_{L,R} = \left| \partial_\mu - \sqrt{\frac{1}{2}} \left( \frac{-i}{2} g\tau \cdot \mathbf{W}_L + \frac{i}{2} g' B_\mu \right) X_L \right|^2 + \left| \partial_\mu - \sqrt{\frac{1}{2}} \left( \frac{-i}{2} g\tau \cdot \mathbf{W}_R - \frac{i}{2} g' B_\mu \right) X_R \right|^2 \quad (2)$$

Dengan  $X_L$  dan  $X_R$  adalah medan skalar Higgs kiri dan kanan yang memiliki nilai harap vakum  $v_L$  dan  $v_R$ .

Jika dimasukkan nilai harap vakum maka diperoleh persamaan berikut:

$$\left( \frac{1}{2} g v_L \right)^2 W_{\mu L}^+ W_L^{\mu -} + \left( \frac{1}{2} g v_R \right)^2 W_{\mu R}^+ W_R^{\mu -} + \frac{1}{2} (W_{\mu L}^3 W_{\mu R}^3 B_\mu) M_{WB} \begin{pmatrix} W_L^{3\mu} \\ W_R^{3\mu} \\ B_\mu \end{pmatrix} \quad (3)$$

Suku pertama dan kedua memberikan massa boson tera bermuatan, yaitu:

$$M_{W_L}^2 = \frac{1}{4} g^2 v_L^2 \text{ dan } M_{W_R}^2 = \frac{1}{4} g^2 v_R^2 \quad (4)$$

Sedangkan suku ketiga memberikan massa boson tera netral, dengan  $M_{WB}$  diberikan oleh

$$M_{WB} = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} g^2 v_L^2 & 0 & -g g' v_L^2 \\ 0 & g^2 v_R^2 & -g g' v_R^2 \\ -g g' v_L^2 & -g g' v_R^2 & g'^2 (v_R^2 + v_L^2) \end{pmatrix} \quad (5)$$

Diagonalisasi matriks  $M_{WB}$  akan memberikan *eigenvalues* yang merupakan massa foton A, boson tera netral Z, dan boson tera netral Z' [2]. Dalam SM matriks boson tera netral hanya berukuran 2x2 sehingga hanya memberikan massa A dan Z. Proses pendagonalisasian matriks  $M_{WB}$  dan penulisannya dalam basis massa boson tera yang akan menentukan nilai spesifik massa Z'. Terdapat beberapa pendekatan yang dilakukan dalam mendagonalisasikan  $M_{WB}$ , lebih spesifik yaitu pendekatan dalam menentukan nilai dari persamaan berikut:

$$M_{Z'}^2 = \frac{1}{2} g^2 v_L^2 + \frac{1}{2} g^2 v_R^2 + \frac{1}{2} g'^2 v_L^2 + \frac{1}{2} g'^2 v_R^2 + \frac{1}{2} (g^4 v_L^4 - 2g^4 v_L^2 v_R^2 + 2g^2 g'^2 v_L^4 - 4g^2 v_L^2 g'^2 v_R^2 + g^4 v_R^4 + 2g^2 v_R^4 g'^2 + g'^4 v_L^4 + 2g'^4 v_L^2 v_R^2 + g'^4 v_R^4)^{1/2} \quad (6)$$

Tampak bahwa nilai  $M_{Z'}$  bergantung pada beberapa variabel, sehingga ada beberapa variasi dalam mengambil pendekatan nilai massa Z'.

**MASSA Z' DALAM VARIAN MODEL LRS**

**A. Model LRS dengan Bidublet**

Varian model LRS yang paling awal memiliki bidublet Higgs dalam sektor Higgs [2], [9]. Model ini memiliki grup tera seperti dalam persamaan (1), dan fermion dalam model ini memiliki pasangan di sektor kanan termasuk neutrino. Model ini memiliki satu bidublet Higgs untuk membangkitkan massa partikel, yang juga menghubungkan sektor kiri dan kanan, yaitu

$$\langle \varphi \rangle = \begin{pmatrix} k & 0 \\ 0 & k' \end{pmatrix} \quad (7)$$

Selain bidublet, juga terdapat 2 medan Higgs, masing-masing untuk sektor kiri dan kanan

$$\langle \chi_L \rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ v_L \end{pmatrix}, \quad \langle \chi_R \rangle = \begin{pmatrix} v_R \\ 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

Struktur medan Higgs seperti ini setelah mengalami perusakan simetri (*Symmetry Breaking*, SB) akan memberikan massa  $Z'$  dalam bentuk yang hampir sama dengan persamaan (6). Pendekatan yang dilakukan dalam model ini telah dijelaskan dalam pustaka [10], yaitu dengan mengambil kuadrat sempurna dari bentuk akar dalam persamaan (6) lalu mengambil batasan bahwa  $(k^2 + k'^2) \ll v_{R,L}^2$ . Nilai massa  $Z'$  diberikan oleh

$$\begin{aligned} M_{Z'}^2 &\cong \frac{1}{2}(g^2 + g'^2)(v_L^2 + v_R^2) \\ &\quad - \frac{1}{2}g^2v_L^2 \left(1 + \frac{g'^2}{g^2+g'^2}\right) \\ &\cong \frac{1}{2}g^2 \left(\frac{g^2+g'^2}{g^2}\right)v_R^2 - \frac{1}{2}g'^2 \left(1 + \frac{g^2}{g^2+g'^2}\right)v_L^2 \end{aligned} \quad (9)$$

dengan mendefinisikan sudut  $\theta$  yang diberikan oleh

$$\tan \theta = \frac{g'}{\sqrt{g^2+g'^2}} \quad (10)$$

dan dalam batas  $v_R^2 > v_L^2$  maka diperoleh hubungan berikut

$$M_{Z'} = \frac{M_{W_R} \cos \theta}{\sqrt{\cos 2\theta}} = v_R \sqrt{g^2 + g'^2} \quad (11)$$

dengan  $M_{W_R}$  diberikan oleh persamaan (4). Massa  $Z'$  diberikan oleh parameter  $\theta$ , namun bentuknya berbeda dengan bentuk yang dimiliki oleh  $Z$  dalam SM. Tampak bahwa nilai massa  $Z'$  diberikan oleh harga harap vakum  $v_R$ . Di dalam model dengan bidublet semacam ini akan terjadi pencampuran (*mixing*) orde pertama/*tree level* antara boson tera bermuatan  $W_R$  dan  $W_L$ , yang sampai saat ini belum terdeteksi. Ini menjadi faktor yang membuat penggunaan

bidublet ditinggalkan dalam model LRS lainnya.

### B. Model LRS dengan penggandaan partikel SM

Model LRS yang lain adalah model yang menggandakan isi/konten partikel dalam SM dengan menambahkan pasangan menggunakan simetri paritas. Salah satu model dengan konten partikel semacam ini diajukan oleh grup Coutinho dan de Almeida ([2] dan [3]). Grup tera tetap seperti dalam persamaan (1) dan sektor Higgs dalam model ini terdiri dari 2 dublet  $\chi_L$  dan  $\chi_R$  serta 3 singlet skalar  $s_D, s_{M_L}$ , dan  $s_{M_R}$ . Bidublet dalam model ini sifatnya opsional dan dapat dipilih nilai harga harap vakum yang sangat kecil untuk bidublet. Konsekuensi dari pemilihan sektor Higgs semacam ini adalah *mixing* antara boson tera bermuatan tidak terjadi dalam orde pertama, *mixing* akan terjadi dalam orde berikutnya yaitu dalam *loop*, sehingga nilainya akan sangat kecil. Dalam model ini juga digunakan simetri  $Z_2$  guna mencegah peluruhan yang tidak diinginkan. Dengan parameterisasi perbandingan harga harap vakum kiri dan kanan diberikan oleh  $\omega = v_L/v_R$  maka massa  $Z'$  sebagai pendekatan nilai persamaan (6) diberikan oleh

$$M_{Z'}^2 = \frac{1}{4}v_R^2 g^2 \tan^2 \theta_W \tan^2 \beta \left(1 + \frac{\omega^2 \sin^2 2\beta}{4 \sin^2 \theta_W}\right) \quad (12)$$

dengan sudut *mixing* diberikan oleh

$$\sin^2 \theta_W = \frac{g^2 g'^2}{g^4 + 2g^2 g'^2}, \quad \sin^2 \beta = \frac{g'^2}{g^2 + g'^2} \quad (13)$$

Tampak bahwa dalam model ini massa  $Z'$  memiliki kontribusi dari sektor kiri yaitu dari harga harap vakum Higgs kiri  $v_L$ . Nilai tersebut masuk di dalam koreksi di dalam persamaan (12), yaitu di dalam suku  $\omega^2$ . Batasan dalam model ini menyatakan bahwa nilai minimum  $v_R > 30 v_L$ . Dalam model ini seluruh fermion memperoleh massa bukan melalui pembangkitan massa standar dalam SM, namun melalui mekanisme *seesaw* [11] dan neutrino memperoleh massa melalui mekanisme *double seesaw*. Massa  $Z'$  menjadi salah satu parameter penting ketika menentukan penanda/*signature* di LHC (*Large Hadron Collider*, di CERN) untuk model ini. Kemungkinan peluruhan dan *branching ratios* untuk  $Z'$  telah didiskusikan untuk beberapa rentang  $M_{Z'}$  dan diprediksi adanya peluruhan  $Z' \rightarrow$  neutrino yang dapat memberikan penanda yang jelas untuk  $Z'$  dalam

model ini di LHC. Namun model ini memiliki kelemahan yaitu massa partikel yang dibangkitkan melalui *seesaw* tidak akan memiliki kopling yang proporsional terhadap massa, yang tidak sesuai dengan hasil eksperimen terbaru [12].

### C. Model LRS dengan penambahan bilangan kuantum

Model LRS dapat diberi tambahan simetri baru berupa simetri  $Z_2$  seperti model yang dibahas sebelum ini atau penambahan bilangan kuantum baru untuk mencegah terjadinya fenomena yang tidak diinginkan (peluruhan proton, pelanggaran konservasi bilangan lepton, dan lainnya). Salah satu model yang menggunakan penambahan bilangan kuantum baru adalah dengan menambahkan bilangan kuantum  $F$  [6]. Grup tera tetap diberikan oleh persamaan (1), serta sektor Higgs yang terdiri dari 2 dublet  $\chi_L$  dan  $\chi_R$  ditambah 2 leptoquark  $\rho$  dan  $\eta$ . Leptoquark digunakan untuk memfasilitasi peluruhan partikel sektor kanan. Selain itu di dalam model ini diperkenalkan bilangan kuantum baru  $F$  dengan nilai 1 untuk fermion dan 0 untuk partikel skalar. Bilangan  $F$  ini mencegah munculnya suku massa Majorana untuk neutrino, sehingga dalam model ini seluruh neutrino adalah neutrino Dirac. Massa  $Z'$  diberikan oleh

$$M_{Z'}^2 = \frac{1}{8} v_R^2 (g^2 + g'^2) \times \left( (1 + \omega^2)^2 - (1 - \omega^2)^2 + \frac{4\omega^2 g'^4}{(g^2 + g'^2)^2} \right)^{1/2} \cong \frac{1}{4} v_R^2 g^2 \frac{\tan^2 \theta_W}{\sin^2 2\beta} (1 + \omega^2 \sin^4 2\beta) \quad (14)$$

dengan sudut mixing diberikan oleh persamaan (13) dan  $\omega = v_L/v_R$ . Tampak terdapat perbedaan antara persamaan (12) dan (14), koreksi dari  $\omega$  memiliki nilai berbeda, begitupun untuk faktor dari sudut mixing  $\beta$ . Hal ini diakibatkan oleh pendekatan yang berbeda dalam mengambil suku binomial untuk  $\omega$  [13]. Model ini memiliki aspek fenomenologis yang mirip dengan model sebelumnya, sehingga diperkirakan untuk partikel  $Z'$  akan memiliki karakteristik yang sama,  $Z'$  akan menjadi penanda melalui peluruhan  $Z' \rightarrow$  neutrino di LHC. Namun di dalam model ini seluruh partikel mengalami pembangkitan massa melalui kopling Yukawa standar seperti dalam

SM, sehingga tidak memiliki permasalahan dengan proporsionalitas massa dengan kopling. Hanya massa neutrino kanan di dalam model ini yang dibangkitkan melalui mekanisme seesaw tipe Dirac. Model ini juga mengambil nilai harga harap vakum yang sangat kecil untuk bidublet sehingga tidak terjadi mixing antara boson tera bermuatan dalam orde pertama. Dengan menggunakan beberapa batasan, model ini juga mampu menjawab asimetri partikel-antipartikel melalui proses baryogenesis yang dialami leptoquark, serta dapat memenuhi batasan dari Big Bang Nucleosynthesis. Hanya saja di dalam model ini tidak terdapat partikel yang dapat menjadi kandidat materi gelap (dark matter).

### D. Model LRS dengan penambahan grup tera

Model LRS dapat diberi tambahan grup tera baru sehingga bentuknya tidak lagi sama dengan persamaan (1). Varian model LRS ini salah satunya diajukan oleh Neves, Helayel-Neto, Mohapatra dan Okada [5]. Grup tera dalam model ini adalah

$$SU(3) \times SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)_{B-L} \times U(1)_X \quad (15)$$

Dalam model ini terdapat dua grup  $U(1)$ , yang pertama adalah grup yang sama seperti dalam model LRS lain maupun dalam SM (notasi B-L digunakan untuk menerangkan grup ini terkait dengan muatan baryon dan lepton), sedangkan grup  $U(1)$  kedua adalah grup baru yang diperkenalkan sebagai  $U(1)$  portal. Dengan memperkenalkan grup tersebut, akan diperoleh partikel baru berupa singlet fermion yang dapat menjadi kandidat materi gelap.

Dalam model ini terdapat 4 medan Higgs dan 3 diantaranya adalah multiplet, yaitu

$$\phi = \begin{pmatrix} \phi_1^0 & \phi_2^+ \\ \phi_1^- & \phi_2^0 \end{pmatrix}, \quad \Delta_L = \begin{pmatrix} \frac{\Delta_L^+}{\sqrt{2}} & \Delta_L^{++} \\ \Delta_L^0 & -\frac{\Delta_L^+}{\sqrt{2}} \end{pmatrix},$$

$$\Delta_R = \begin{pmatrix} \frac{\Delta_R^+}{\sqrt{2}} & \Delta_R^{++} \\ \Delta_R^0 & -\frac{\Delta_R^+}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (16)$$

dan ditambah satu medan Higgs singlet  $\Xi$  yang memiliki nilai harga harap vakum yang merusak

simetri  $U(1)_X$ . Nilai harga harap vakum untuk masing-masing medan adalah

$$\begin{aligned} \langle \phi_1^0 \rangle &= \frac{v_1}{\sqrt{2}}, \quad \langle \phi_2^0 \rangle = \frac{v_2}{\sqrt{2}}, \quad \langle \Delta_L^0 \rangle = \frac{v_L}{\sqrt{2}} \\ \langle \Delta_R^0 \rangle &= \frac{v_R}{\sqrt{2}}, \quad \langle \Xi \rangle = \frac{u}{\sqrt{2}} \end{aligned} \quad (17)$$

Dipilih hubungan antara nilai-nilai tersebut supaya bisa memberikan hasil seperti dalam SM, yaitu  $v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 + v_L^2} = 246 \text{ GeV}$ . Dengan sektor Higgs dan grup tera seperti ini, maka matriks massa boson tera netral tidak lagi diberikan oleh persamaan (5), namun berbentuk matriks  $4 \times 4$ . Diagonalisasi matriks tersebut memberikan 2 partikel yang diidentifikasi sebagai foton dan boson  $Z$  serta 2 partikel baru yaitu  $Z'$  dan  $X$ . Massa  $Z'$  dalam model ini diberikan oleh

$$M_{Z'} \cong v_R \sqrt{g^2 + g_{BL}^2} \quad (18)$$

di mana  $g_{BL}$  adalah konstanta kopling  $U(1)_{B-L}$  yang identik dengan  $g'$  dalam model-model sebelumnya. Notasi tersebut digunakan untuk membedakan antara kopling  $g_{BL}$  dan  $g_X$  milik  $U(1)_X$ . Persamaan (18) memberikan nilai yang persis sama dengan persamaan (11), karena dianggap nilai  $v_R \gg v_L$ . Peluruhan  $Z'$  telah dihitung dan diperiksa kesesuaiannya dengan eksperimen ATLAS di LHC, melalui proses resonansi dengan keadaan akhir berupa dilepton ( $e^+e^- + \mu^+\mu^-$ ). Namun dengan adanya partikel  $X$  yang juga merupakan boson tera netral, maka peluruhan  $Z'$  akan memiliki faktor koreksi yang melibatkan proses peluruhan  $X$ . Di dalam model ini juga telah diperiksa kemungkinan partikel  $X$  menjadi materi gelap dan kesesuaiannya dengan eksperimen yang telah maupun akan berjalan (*High Luminosity* LHC, LUX ZEPLIN dan XENON1T).

### KESIMPULAN

Model LRS sebagai perluasan dari SM telah banyak diteliti karena memiliki aspek fenomenologis yang kaya. Ekstensi SM ke model LRS memberi konsekuensi adanya partikel boson tera netral baru  $Z'$ . Nilai massa  $Z'$  adalah parameter yang penting untuk mendeteksi sektor kanan melalui proses peluruhan  $Z'$ . Diagonalisasi matriks massa  $3 \times 3$  untuk memperoleh  $M_{Z'}$  telah memberikan nilai yang berbeda karena penggunaan pendekatan yang berbeda untuk tiap parameter yang ada di dalamnya. Secara umum nilai  $M_{Z'}$  dominan ditentukan oleh harga harap vakum Higgs kanan

$v_R$ . Model LRS awal dengan bidoublet memberikan nilai  $M_{Z'} = \frac{M_{WR} \cos \theta}{\sqrt{\cos 2\theta}} = v_R \sqrt{g^2 + g'^2}$ , yang sama dengan nilai dalam model dengan tambahan  $U(1)_X$ . Nilai tersebut diperoleh dengan pemilihan  $v_R \gg v_L$ . Untuk model dengan penggandaan partikel SM dan penggunaan *seesaw* untuk pembangkitan massa seluruh partikel diperoleh nilai  $M_{Z'}^2 = \frac{1}{4} v_R^2 g^2 \tan^2 \theta_W \tan^2 \beta \left( 1 + \frac{\omega^2 \sin^2 2\beta}{4 \sin^2 \theta_W} \right)$ . Nilai ini diperoleh dengan melakukan faktorisasi parameter  $\omega$ , sehingga dalam model ini nilai massa  $Z'$  memiliki faktor penyumbang dari harga harap vakum Higgs kiri  $v_L$ . Untuk model dengan penambahan bilangan kuantum baru, diperoleh nilai  $M_{Z'}^2 = \frac{1}{4} v_R^2 g^2 \frac{\tan^2 \theta_W}{\sin^2 2\beta} (1 + \omega^2 \sin^4 2\beta)$ . Tampak bahwa juga terdapat faktor  $v_L$  di dalamnya, namun karena digunakan pendekatan binomial yang berbeda maka diperoleh faktor yang berbeda jika dibandingkan model sebelumnya. Masing-masing model memiliki aspek fenomenologis yang berbeda dan memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing.

### PUSTAKA

- [1] J. C. Pati and A. Salam, Lepton number as the fourth 'color', *Phys. Rev. D* 10(1) (1974) 275–289.
- [2] G. Senjanović, Spontaneous breakdown of parity in a class of gauge theories, *Nucl. Physics, Sect. B* 153(C) (1979) 334–364.
- [3] Y. A. Coutinho, J. A. Martins Simões, and C. M. Porto, Fermion masses in a model for spontaneous parity breaking, *Eur. Phys. J. C* 18(4) (2001) 779–784.
- [4] F. M. L. De Almeida et al., Double seesaw mechanism in a left-right symmetric model with TeV neutrinos, *Phys. Rev. D - Part. Fields, Gravit. Cosmol.* 81(5) (2010) 1–7.
- [5] M. J. Neves, J. A. Helayél-Neto, R. N. Mohapatra, and N. Okada, Minimally extended left-right symmetric model for dark matter with  $U(1)$  portal, *J. High Energy Phys.* 2018 (12) (2018).
- [6] A. S. Adam, A. Ferdiyan, and M. Satriawan, A New Left-Right Symmetry Model, Unpublished, no. arXiv:1903.03370, (2019).

- [7] S. Chakdar, K. Ghosh, S. Nandi, and S. K. Rai, Collider signatures of mirror fermions in the framework of a left-right mirror model, *Phys. Rev. D - Part. Fields, Gravit. Cosmol.* 88 (9) (2013) 1–16.
- [8] P. Langacker, The physics of heavy  $Z'$  gauge bosons, *Rev. Mod. Phys.* 81 (3) (2009) 1199–1228.
- [9] R. N. Mohapatra and G. Senjanović, Neutrino masses and mixings in gauge models with spontaneous parity violation, *Phys. Rev. D* 23(1) (1981) 165–180.
- [10] A. Ferdiyan, Cara Baru Pembentukan Massa Dalam Model Simetri Kiri-Kanan, Skripsi, Universitas Gadjah Mada, 2010.
- [11] M. Gell-Mann, P. Ramond, and R. Slansky, "Supergravity," in *Complex Spinors and Unified Theories* (1979) 315.
- [12] M. Aaboud, Cross-section measurements of the Higgs boson decaying to a pair of tau leptons in proton–proton collisions at  $\sqrt{s}=13$  TeV with the ATLAS detector, *Phys. Rev. D* 99(7) (2019) 104.
- [13] A. S. Adam, Bariogenesis dalam Model Cermin CP, Tesis, Universitas Gadjah Mada, 2013.